รหัสโครงการ SUT7-712-57-24-28

รายงานการวิจัย

ลักษณะคละของโจทย์ปัญหาและความต่อเนื่องของการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้น

(Demand Assortment of Cutting Stock Problem with Contiguity for One-dimensional Construction Materials)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รหัสโครงการ SUT7-712-57-24-28

รายงานการวิจัย

ลักษณะคละของโจทย์ปัญหาและความต่อเนื่องของการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้น
(Demand Assortment of Cutting Stock Problem with Contiguity for One-dimensional Construction Materials)

คณะผู้วิจัย
หัวหน้าโครงการ
รองศาสตราจารย์ ดร. วชรภูมิ เบญจโอฬาร
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีปีงบประมาณพ.ศ. 2557-8
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มกราคม 2559

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งต่อมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนเงินทุนที่ใช้ในการวิจัยของโครงการนี้จนสามารถสำเร็จลงได้ ด้วยเงินงบประมาณประจำปี พ.ศ. 2557 และ 2558 ที่ผ่านการพิจารณาข้อเสนอโครงการโดยคณะกรรมวิจัยแห่งชาติ และขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งสำหรับความร่วมมือจากผู้บริหารและพนักงานของบริษัทก่อสร้างที่สนับสนุนข้อมูลสำคัญในการวิจัย

คณะผู้วิจัย

มกราคม 2559

บทคัดย่อ

งานก่อสร้างมีการใช้วัสดุเชิงเส้นจำนวนมากและหลากหลายประเภท โดยที่มีความต้องการใช้ในหลากหลายขนาดและมีความยาวแตกต่างกันเป็นจำนวนมาก ในขณะที่วัสดุก่อสร้างคงคลังเหล่านี้มีจำหน่ายที่ขนาดความยาวมาตรฐาน จึงต้องนำมาตัดให้ได้ขนาดความยาวที่ต้องการซึ่งทำให้เกิดความสูญเสียจากเศษการตัดจำนวนมาก รวมทั้งสูญเสียแรงงานและพื้นที่ที่ใช้ในการกองเก็บขนาดความยาวที่ยังตัดได้ไม่ครบจำนวน ซึ่งแบบจำลองของปัญหาการตัดและแบบจำลองของปัญหาความต่อเนื่องสามารถนำมาช่วยสร้างแผนการตัดที่ดีที่สามารถลดเศษจากการตัดลงได้มากและทำให้เกิดความต่อเนื่องในการตัดด้วย โดยที่งานวิจัยที่ผ่านมามักมุ่งประเด็นไปที่การพัฒนาวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดจากแบบจำลองปัญหา แต่ลักษณะคละของโจทย์ปัญหาที่เกิดจากขนาดความยาวและจำนวนท่อนที่ต้องการที่หลากหลายแตกต่างกันก็เป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ส่งผลต่อปริมาณของเศษจากการตัดกลับยังไม่ได้รับความสนใจศึกษา งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของลักษณะคละของความต้องการกับปริมาณเศษการตัดที่เกิดขึ้นและกับความต่อเนื่องของการตัด โดยได้มีการออกแบบการทดสอบขึ้นจำนวนมากด้วยการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรของโจทย์ปัญหาอย่างเป็นระบบ และได้กำหนดแบ่งกลุ่มช่วงของขนาดความยาวที่ต้องการออกเป็น 6 ช่วง รวมทั้งใช้หลักทางสถิติเพื่อประเมินผลคำตอบที่ได้ ผลที่ได้พบว่าการกระจายของสัดส่วนจำนวนท่อนที่ต้องการระหว่างกลุ่มช่วงความยาวต่าง ๆ มีผลต่อปริมาณเศษการตัดรวม กลุ่มช่วงความยาวขนาดยาว ($L_i/LS > 0.500$) ส่งผลไปในทางให้เศษการตัดมากขึ้น กลุ่มช่วงความยาวขนาดกลาง ($0.200 < (L_i/LS) <= 0.500$) มีความจำเป็นต่อการสร้างรูปแบบการตัดที่เกิดเศษการตัดน้อย และหากกลุ่มช่วงความยาวขนาดสั้น ($(L_i/LS) <= 0.200$) มีสัดส่วนที่มากกว่าจะช่วยให้ปริมาณเศษการตัดรวมลดลงได้ และจำนวนรูปแบบการตัดที่ใช้ในแผนการตัด (*nDiffPat*) ส่งผลอย่างมากต่อความต่อเนื่องของงานการตัดวัสดุ ผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้จึงช่วยให้เข้าใจรูปแบบลักษณะคละของความต้องการที่ส่งผลต่อปริมาณของเศษการตัด ซึ่งทำให้ได้วิธีการกำหนดล็อตของงานการตัดวัสดุเชิงเส้นเพื่อให้มีลักษณะคละที่เหมาะสมที่จะทำให้เหลือเศษการตัดลดน้อยยิ่งขึ้นไปอีก จากที่ได้คำตอบแผนการตัดที่ดีที่สุดจากแบบจำลองปัญหาการตัดและปัญหาความต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้นด้วย

คำสำคัญ: ปัญหาการตัดวัสดุคงคลัง, วัสดุก่อสร้างเชิงเส้น, ลักษณะคละของความต้องการ, ความต่อเนื่องของการตัด, การวางแผนการตัด, เศษการตัด, เหล็กเส้น

Abstract

Construction work consumes a huge amount and various types of one dimensional materials in many different sizes and lengths. Normally, these stock materials are sold and are available in only a few standard lengths. To prepare them for the construction, the stock materials are cut into small different lengths and number of pieces and there is a lot of trim loss in the process including labor and stockyard spent for storing open orders. The one-dimensional cutting stock problem and the contiguity problem models were invented in literature to determine the optimal cutting plans with the minimum trim loss and the most contiguous cutting sequences. However, demand assortment, which consists of the demanded lengths and number of pieces of the job, is a crucial factor of the amount of trim loss. This demand can vary considerably from job to job according to the designs and the components of the building structures. It is still unclear how this combination of the demanded lengths and number of pieces affect the loss. This research conducts the experiment and uses the sensitivity analysis technique to extract the correlation between the variation of the demand and the cutting loss. The demanded lengths are divided into six continuous ranges and the proportions of the demanded number of each range are controlled. The combination of demanded length and number of pieces are systematically altered to simulate many different decent jobs. Statistical techniques are also applied to analyze the results. The results show that the proportion of demanded number of pieces between the six ranges has an impact on the trim loss. The long length range (L_i/LS > 0.500) increases the trim loss whereas the short length range ((L_i/LS) <= 0.200) decreases it. The intermediate length range (0.200 < (L_i/LS) <= 0.500) is necessary for the formulation of efficient cutting patterns. The number of different cutting patterns in the plans has an influence on the contiguity of the cutting jobs. The outcome of this research helps in building a wise strategy to arrange cutting jobs with the right assortments, which produce even less trim loss along the project timeline and consequently save the project cost.

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

สารบัญ

หน้า

สารบัญรูป

หน้า

สารบัญตาราง

หน้า

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

งานก่อสร้างต้องการใช้วัสดุก่อสร้างเชิงเส้น (one-dimensional materials) จำนวนมากและหลากหลายประเภท ได้แก่ เหล็กเส้น เหล็กรูปพรรณ ไม้รูปพรรณ ท่อต่าง ๆ เป็นต้น ซึ่งวัสดุเหล่านี้ซื้อขายกันที่ความยาวมาตรฐาน (stock materials) และจำเป็นต้องตัดให้ได้ขนาดท่อนต่าง ๆ ตามที่ต้องการใช้งาน ซึ่งกระบวนการตัดวัสดุจะทำให้เกิดเศษการตัด (trim losses) ขึ้นจำนวนมาก โดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นที่นิยมในประเทศไทย ต้องการใช้วัสดุเหล็กเส้นเป็นจำนวนมากและมีราคาต่อหน่วยค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับอัตราค่าจ้างต่ำของคนงาน การวางแผนการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นเพื่อให้เกิดเศษการตัดน้อยจะเป็นสิ่งที่คุ้มค่าอย่างยิ่ง จากการสำรวจการปฏิบัติงานจริงในโครงการก่อสร้างพบว่า คนงานช่างเหล็กมักเป็นผู้ที่ต้องวางแผนการตัดเหล็กเส้นต่าง ๆ ด้วยตนเอง แทนที่จะเป็นวิศวกร ซึ่งคนงานใช้ความคิดและประสบการณ์ส่วนตัวในการสร้างแผนการตัดโดยปราศจากเครื่องมือช่วยคำนวณ ทำให้อัตราการสูญเสียจากการตัดสูงมาก ซึ่งอาจมากถึงกว่า 10% จากข้อมูลการสำรวจ

ปัญหาการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นจัดอยู่ในประเภทปัญหาที่เรียกว่า One Dimensional Cutting Stock Problem (1D-CSP) ซึ่งถูกจัดเป็นปัญหาประเภทหนึ่งในกลุ่มของปัญหาการตัดและการบรรจุ (Cutting and Packing Problem) และเป็นที่สนใจในการวิจัยอย่างต่อเนื่องยาวนานมาหลายทศวรรษ ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมการผลิตหลายประเภท ซึ่งรวมทั้งงานก่อสร้าง ปัญหา 1D-CSP คือการนำวัสดุคงคลังเชิงเส้น (one dimensional stock materials) ที่มีขนาดความยาวมาตรฐานมาตัดออกเป็นท่อนสั้น ๆ ให้ได้ขนาดและจำนวนต่าง ๆ กันตามที่ต้องการ (Dyckhoff 1990; Wäscher et al. 2007) โดยทั่วไปปัญหานี้มีข้อกำหนดให้มีวัสดุเชิงเส้นจำนวนไม่จำกัดและมีขนาดความยาวมาตรฐาน (*LS*) ขนาดเดียว เรียกว่า วัสดุคงคลัง (stock) รายการความต้องการ (demand list) จะประกอบด้วยความยาวขนาดต่างๆกัน m ความยาว แต่ละขนาดมีความยาว (L_i) ดังนี้คือ ($L_1, L_2, L_3,..., L_m$) เมตร และต้องการเป็นจำนวน D_i ดังนี้คือ ($D_1, D_2, D_3, ..., D_m$) ท่อน การแก้ปัญหาคือการหาคำตอบที่เป็นแผนการตัด (cutting plan) เพื่อให้ได้ท่อนความยาวขนาดต่าง ๆ กันและจำนวนต่าง ๆ ตามรายการความต้องการครบทั้งหมด ในขณะที่เกิดเศษการตัด (trim loss) รวมน้อยที่สุด

นอกจากนี้ปัญหา 1D-CSP ยังมีความหลากหลายแตกต่างกันไปตามเงื่อนไขข้อจำกัด (constraints) และฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective functions) ที่ขึ้นอยู่กับสภาพงานจริงที่ได้นำไปประยุกต์ใช้ อย่างไรก็ตามแม้จะมีความหลากหลายดังกล่าวแต่แนวทางการหาคำตอบของปัญหาสามารถแบ่งออกได้สองแนวทางคือ item-oriented and pattern-oriented approaches (Dyckhoff 1990; Gradisar et al. 1999) แนวทาง item-oriented approach จะพิจารณาตัดท่อนความยาวที่

ต้องการ (demanded item) ทีละชิ้นเรียงเป็นรายตัวตามรายการ เอาจากวัสดุคงคลังเส้นที่ถูกตัดไปแล้วหรือวัสดุคงคลังเส้นใหม่ ในขณะที่แนวทาง pattern-oriented approach จะแบ่งขั้นตอนเป็นการสร้างรูปแบบการตัดที่ดี (efficient cutting patterns) ขึ้นก่อนแล้วจึงหาว่าจะต้องตัดตามรูปแบบเหล่านั้นซ้ำอย่างละกี่ครั้ง (cutting times) จึงจะได้ท่อนที่ต้องการครบทั้งหมด แนวทาง item-oriented approach จะเหมาะสมกับปัญหาที่มีลักษณะไม่เป็นระบบระเบียบ เช่น มีวัสดุคงคลังหลายขนาดความยาว มีจำนวนวัสดุคงคลังไม่เพียงพอ หรือมีท่อนความยาวที่ต้องการหลากหลายขนาดแต่ต้องการเป็นจำนวนน้อย ๆ วิธีการหาคำตอบจะอยู่บนพื้นฐานของ bin packing-algorithms หรือ custom heuristic algorithms (Gradisar et al. 1999; Cherri, Arenales, and Yanasse 2009)

แนวทาง pattern-oriented approach มีการใช้อย่างแพร่หลายกว่าในงานวิจัยที่ผ่านมา โดยเฉพาะที่อยู่บนพื้นฐานงานวิจัยของ Gilmore and Gomory (1961; 1963) แนวทางนี้มีความเหมาะสมกับปัญหา 1D-CSP ปกติทั่วไป โดยเฉพาะที่มีเงื่อนไขวัสดุคงคลังขนาดความยาวมาตรฐานเพียงขนาดเดียว (single sized stocks) ขั้นตอนการสร้างรูปแบบการตัดนั้นอาจใช้กฎ heuristic rule (Pierce 1964) หรือใช้การสุ่ม random search algorithm (Vahrenkamp 1996) ส่วนขั้นตอนการหาจำนวนการตัดซ้ำจะใช้การสร้างแบบจำลองของปัญหาด้วย integer linear programming แนวทางนี้สามารถให้คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาการตัดที่มีขนาดไม่ใหญ่เกินไปได้จากวิธี Delayed Pattern Generation ที่เสนอโดย Gilmore and Gomory (1961; 1963) หรืออาจใช้วิธี Sequential Heuristic Procedure (SHP) (Haessler and Sweeney 1991) ซึ่งเป็นการสร้างรูปแบบการตัดขึ้นคราวละหนึ่งแล้วจึงหาจำนวนการตัดซ้ำให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ จากนั้นจึงปรับปรุงรายการความต้องการที่ยังเหลืออยู่ จากนั้นจึงวนรอบกลับไปสร้างรูปแบบการตัดอันใหม่ขึ้น เช่นนี้เรื่อยไปจนครบทั้งหมด นอกจากนี้ยังมีวิธีการหาคำตอบอื่น ๆ ที่ใช้ stochastic techniques ในการหาคำตอบของแบบจำลองปัญหา integer linear programming ดังกล่าว เช่น Genetic algorithm (Salem, Shahin, and Khalifa 2007), Evolutionary algorithm (Liang et al. 2002) วิธีการเหล่านี้สามารถควบรวม non-linear objective functions ไว้ด้วยได้ แต่ก็มีข้อด้อยที่คำตอบที่ได้อาจไม่เท่ากันสม่ำเสมอ (inconsistent) และอาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด (approximately near-optimal)

แผนการตัดวัสดุเชิงเส้นที่มีประสิทธิภาพดีนั้นสามารถสร้างขึ้นได้จากการหาคำตอบของแบบจำลองปัญหาการตัดวัสดุเชิงเส้น 1D-CSP ซึ่งสามารถช่วยสร้างแผนการตัดที่ให้เศษการตัดลดลงเหลือประมาณ 2% ได้ แต่เนื่องจากแบบจำลองนี้มีความซับซ้อนเกี่ยวข้องกับตัวแปรจำนวนมากและคำตอบที่ได้ขึ้นกับตัวโจทย์ ซึ่งความต้องการใช้วัสดุเหล็กเส้นของโครงการก่อสร้างยังมีลักษณะคละที่หลากหลาย (demand assortment) และอาจขึ้นกับประเภทและขนาดของสิ่งก่อสร้าง ที่ทำให้จำนวนท่อนความต้องการและช่วงขนาดความยาวท่อนเป็นส่วนผสมที่หลากหลาย เช่น ความต้องการใช้อาจเป็นขนาดท่อนความยาวไม่กี่ขนาดแต่ต้องการเป็นจำนวนมาก หรือมีขนาดท่อนความยาวหลากหลายขนาดแต่ต้องการเพียงขนาดละไม่กี่ท่อน

ถึงแม้ว่า 1D-CSP จะมุ่งไปที่ลักษณะคละของรายการความต้องการของปัญหา (demand assortment) ในแบบ weakly heterogeneous แต่ดีกรีความคละก็ไม่ได้ถูกกำหนดไว้อย่างแน่ชัด อ้างถึง Wäscher et al. (2007) ซึ่งเป็นผู้จำแนกปัญหาการตัดและการบรรจุเอาไว้เป็นหมวดหมู่ ก็ได้ระบุไว้เพียงคร่าว ๆ ถึงลักษณะคละของปัญหาในประเภทนี้ คือ มีความต้องการท่อนความยาวที่มีขนาดแตกต่างจำนวนกันไม่มาก เมื่อเทียบกับจำนวนที่ต้องการของแต่ละขนาดเหล่านั้น หรือเมื่อความต้องการท่อนความยาวแต่ละขนาดมีจำนวนที่ค่อนข้างมาก จะกำหนดให้เป็นลักษณะคละแบบ weakly heterogeneous ได้ โดยลักษณะคละแบบนี้ที่ Dyckhoff (1990) ได้กำหนดให้ใช้สัญลักษณ์ ‘R’ ที่หมายถึง many items of relatively few different lengths Dyckhoff (1990) ยังได้ให้ตัวเลขคร่าว ๆ เพื่อการเข้าใจถึงระดับดีกรีที่ต่างกันของลักษณะคละของรายการความต้องการ โดยแบบ ‘F’ หรือ ‘Few items’ เขาได้ใช้ตัวเลข 10 เพื่อบอกถึง ‘only relatively few’ และแบบ ‘M’ or ‘Many items of many different figures’ สำหรับตัวเลขหลักร้อยขึ้นไป สำหรับแบบ ‘R’ นั้นเขาได้อ้างถึงตัวเลขหลักพันขึ้นไปสำหรับขนาดความต้องการที่แตกต่างกันน้อยกว่า 50 ขนาด ในขณะที่ Wäscher et al. (2007) ได้รวมเอาดีกรีของลักษณะคละทั้งแบบ ‘F’ และ ‘M’ ไว้ด้วยกันในประเภท ‘strongly heterogeneous’ และดูเหมือนว่าเขาเน้นไปที่จำนวนของขนาดท่อนที่แตกต่างกันเท่านั้นที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกระหว่าง weakly หรือ strongly heterogeneous ตารางที่ 1 แสดงดีกรีของลักษณะคละของรายการความต้องการของปัญหาการตัด

ตารางที่ 1.1 การแบ่งประเภทของลักษณะคละของรายการความต้องการของปัญหาการตัด (Category of demand assortment)

Degree of demand assortment	Number of different demanded lengths (m)		
Number of pieces (D_i)	One	Few	Many
Few	Homogeneous	Weakly heterogeneous (‘F’?)	Strongly heterogeneous (‘F’)
Many	Homogeneous	Weakly heterogeneous (‘R’)	Strongly heterogeneous (‘M’)

อย่างไรก็ตาม ในกรณีของปัญหาการตัดของวัสดุก่อสร้างเชิงเส้น โดยเฉพาะเหล็กเส้น จะมีลักษณะคละของโจทย์อาจเป็นได้ทั้งแบบ weakly heterogeneous หรือ strongly heterogeneous ซึ่งหมายถึงรายการความต้องการประกอบด้วยท่อนความยาวที่ต้องการหลายขนาดและแต่ละขนาดต้องการเป็นจำนวนหลายท่อน นั่นคือ m และ D_i เป็นค่าตัวเลขมาก Dyckhoff (1990) กำหนดโจทย์ลักษณะนี้ว่า (1/V/I/M), และ Wäscher et al. (2007) ใช้คำว่า Single Bin Size Bin Packing Problem (SBSBPP) ทั้งนี้รายการความต้องการอาจแตกต่างกันได้อย่างมากในแต่ละงานการตัด (job) และยังขึ้นอยู่กับแบบก่อสร้างและประเภทของชิ้นส่วนสิ่งก่อสร้างนั้น ๆ เช่น อาคาร สาธารณูปโภค บ้านพักอาศัย ซึ่งอาจทำให้ลักษณะคละของความต้องการท่อนเหล็กเส้นแตกต่างกันไป

นอกเหนือไปจากความคลุมเครือของการจำแนกระดับดีกรีของลักษณะคละของรายการความต้องการนี้แล้ว ก็ยังคงมีความคลุมเครือในประเด็นของผลกระทบของปัจจัยของลักษณะคละทั้งจำนวนขนาดท่อนที่แตกต่างกัน (demanded lengths) และจำนวนท่อนที่ต้องการแต่ละขนาด (number of pieces) ที่มีต่อเศษการตัดที่จะเกิดขึ้น รวมทั้งสัดส่วนของจำนวนท่อนที่ต้องการยังอาจมีการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอแตกต่างกันไป งานวิจัยที่ผ่านมาในประเด็นนี้ยังคงมีอยู่น้อย ได้แก่ งานของ Riehme et al. (1996) ที่ศึกษาประเด็นความแตกต่างของการกระจายของจำนวนความต้องการในกรณีของการตัดวัสดุ 2 มิติ จึงทำให้งานวิจัยในประเด็นนี้กับกรณีของการตัดวัสดุ 1 มิติ หรือวัสดุเชิงเส้นยังคงขาดแคลนอยู่

อีกปัจจัยสำคัญของแบบจำลองนี้คือประเด็นเรื่องความต่อเนื่อง (contiguity) ของงานการตัดท่อนความยาวที่ต้องการต่าง ๆ ซึ่งเป็นการพิจารณาถึงลำดับการตัดรูปแบบการตัดที่ใช้ และส่งผลต่อจำนวนท่อนความยาวขนาดต่าง ๆ ที่ยังตัดได้ไม่ครบจำนวนตามที่ต้องการ เพื่อให้เกิดจำนวน opened stacks น้อยที่สุด (Yanasse and Pinto Lamosa 2007; Liang et al. 2002) เป็นประเด็นที่ควรนำมาประยุกต์ใช้กับงานก่อสร้าง เนื่องจากโครงการก่อสร้างมักมีรายการความต้องการที่หลายหลากขนาดความยาว หากเป็นวัสดุเหล็กเส้นก็จะมีน้ำหนักต่อหน่วยสูงทำให้เคลื่อนย้ายลำบาก และมีพื้นที่ทำงานจำกัด หากลำดับการตัดมีประสิทธิภาพจะทำให้เกิดความต่อเนื่องในการตัด ซึ่งช่วยลดพื้นที่การทำงานที่ต้องใช้ในการกองชิ้นงานที่ยังตัดได้ไม่ครบจำนวน

งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของปัญหาการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้น (โดยเฉพาะกรณีเหล็กเส้น) และหาความสัมพันธ์ระหว่างความเปลี่ยนแปลงของระดับดีกรีของลักษณะคละของรายการความต้องการที่มีผลกระทบต่อเศษการตัดของงานที่เกิดขึ้น รวมทั้งการจัดลำดับการตัดรูปแบบการตัดของงานการตัดหนึ่งเพื่อให้มีความต่อเนื่องในการตัดดีที่สุด โดยผลที่ได้จะทำให้เกิดความเข้าใจและนำไปเป็นกลยุทธ์ในการกำหนดงานการตัดให้มีลักษณะคละที่เหมาะสมได้

1.2 วัตถุประสงค์

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. สร้างแบบจำลองปัญหาการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นและวิธีการหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพ

2. ศึกษาผลกระทบของลักษณะคละของรายการความต้องการ (demand assortment) ที่มีต่อคำตอบ

3. สร้างแบบจำลองปัญหาการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นที่รวมประเด็นความต่อเนื่องของการตัด (contiguity) และวิธีการหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพ

1.3 ขอบเขต

ขอบเขตของการวิจัยนี้จะครอบคลุมถึงเรื่องต่าง ๆ ดังนี้

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

เนื่องจากแบบจำลองปัญหาการตัดวัสดุเชิงเส้นเกี่ยวข้องกับตัวแปรจำนวนมาก ปัจจัยที่นำมาพิจารณาในการสร้างแบบจำลองและวิธีการหาคำตอบ ได้แก่ ลักษณะคละของโจทย์ปัญหา (demand assortment) และความต่อเนื่องของการตัด (contiguity) ตามความเหมาะสม

โปรแกรมต้นแบบที่จะพัฒนาขึ้นนั้นก็เพื่อให้เกิดความสะดวกในการเผยแพร่องค์ความรู้ที่คิดค้นขึ้นจากโครงการให้สำหรับผู้ที่สนใจ แต่ทั้งนี้ไม่ได้มุ่งเน้นสร้างฟังก์ชั่นอำนวยความสะดวกต่อการใช้งานหรือความสวยงามอย่างเต็มที่ โปรแกรมต้นแบบจะพัฒนาขึ้นจากซอฟแวร์สำนักงานพื้นฐานที่บริษัทก่อสร้างทั่วไปมีใช้อยู่ เพื่อให้สามารถเข้าใจการใช้งานได้รวดเร็ว และสามารถติดตั้งใช้งานได้โดยไม่ต้องพึ่งพาซอฟแวร์เฉพาะทางอื่นใด

1.4 แผนการดำเนินการ

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ จึงได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินโครงการวิจัยตามลำดับดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: ศึกษาทบทวนพัฒนาการของการสร้างแบบจำลองของปัญหาและวิธีการแก้ปัญหา Cutting Stock Problem และ Bin Packing Problem ที่มีอยู่ในปัจจุบัน เพื่อบ่งชี้จุดในการพัฒนาต่อยอดให้ดียิ่งขึ้น

วิธีการ: สืบค้นหนังสือ วารสาร และบทความการประชุมทางวิชาการต่าง ๆ ที่มีอยู่และเข้าถึงได้ อ่านและรวบรวมเพื่อทำความเข้าใจกับพัฒนาการและความหลากหลายของแบบจำลองปัญหาเงื่อนไขแบบต่าง ๆ ที่ใส่เข้าไว้ในแบบจำลอง รวมทั้งของ algorithms ที่ใช้ในการหาคำตอบแบบ heuristics, stochastic, linear programming และ integer programming เพื่อให้เกิดความเข้าใจในแบบจำลองปัญหาและ algorithms ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน รวมทั้งเห็นตัวอย่างความหลากหลายแนวทางการประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ ทำให้สามารถรู้ขีดความสามารถของ algorithms ที่ดีที่สุดที่มีอยู่

ในปัจจุบัน รวมทั้งการเก็บข้อมูลจากโครงการก่อสร้าง จากผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับงานตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้น เพื่อให้เข้าใจในรายละเอียดของวิธีการปฏิบัติงานจริงที่เป็นอยู่และเงื่อนไขทั่วไปจากสภาพการทำงานที่ปรากฏ เพื่อให้ผู้วิจัยพร้อมสำหรับการคิดค้นพัฒนาต่อยอดให้ดียิ่งขึ้นจากที่มีอยู่เดิม สามารถนำมาเป็นข้อมูลเนื้อหา literature reviews เพื่อใช้ประกอบงานเขียนบทความเพื่อเผยแพร่ต่อไป

ขั้นตอนที่ 2: สร้างแบบจำลองปัญหาการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นที่รวมประเด็นความต่อเนื่องของการตัด (contiguity) และสอดคล้องกับสภาพเงื่อนไขการปฏิบัติงานจริง และคิดค้นวิธีการหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพดี

วิธีการ: จากการวิเคราะห์ปัญหาการตัดวัสดุเชิงเส้นจากโครงการก่อสร้างและแบบจำลองปัญหาการตัดวัสดุเชิงเส้นที่มีอยู่ในปัจจุบันในขั้นตอนที่ 1 เพื่อหาจุดด้อยหรือประเด็นเงื่อนไขที่ยังไม่ได้มีการพิจารณารวมเข้าไว้ในแบบจำลอง จากนั้นจึงสังเคราะห์แบบจำลองปัญหาการตัดวัสดุเชิงเส้นสำหรับงานก่อสร้างโดยเฉพาะที่สอดคล้องเหมาะสมกับความจริงที่สุด และจากการวิเคราะห์ algorithms ที่มีอยู่ในปัจจุบัน เพื่อประเมินหาประสิทธิภาพในการหาคำตอบ และทำให้สามารถคิดค้นการปรับปรุง algorithms ใหม่ให้มีประสิทธิภาพดีกว่าเดิม สามารถได้คำตอบที่ดีกว่าโดยที่ทำให้ลดความสูญเสียจากการตัดได้มากขึ้น ต่อมาจึงทำการทดสอบกับตัวอย่างปัญหาและเปรียบเทียบผลที่ได้กับวิธีการแบบเดิม องค์ความรู้ใหม่ที่ได้เป็นการสร้างแบบจำลองปัญหาการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นที่สอดคล้องกับการปฏิบัติงานจริง และ algorithms ใหม่ที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพดีที่คิดค้นขึ้น ซึ่งเหล่านี้จะเป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมต้นแบบ และเพื่อใช้ประกอบงานเขียนบทความเพื่อเผยแพร่ต่อไป

ขั้นตอนที่ 3: พัฒนาโปรแกรมต้นแบบ และทำการทดสอบผลกระทบของลักษณะคละของรายการความต้องการ (demand assortment) ที่มีต่อคำตอบ โดยใช้โจทย์ปัญหาการตัดของโครงการก่อสร้าง และประเมินผล

วิธีการ: โปรแกรมต้นแบบสำหรับการสร้างแผนการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นจะถูกพัฒนาขึ้นจากแบบจำลองปัญหาและวิธีการแก้ปัญหาที่ได้ริเริ่มขึ้นมาใหม่ในขั้นตอนที่ผ่านมา โดยเป็นการพัฒนาโปรแกรมต้นแบบขึ้นมาจากโปรแกรมสำนักงานพื้นฐาน Spreadsheet ที่เป็นที่รู้จักและมีใช้งานกันอยู่แล้วโดยทั่วไป การทดสอบและประเมินผลโปรแกรมต้นแบบดำเนินการโดยการเลือกโจทย์ทดสอบที่มีลักษณะคละแบบต่าง ๆ อ้างอิงบนพื้นฐานข้อมูลของโครงการก่อสร้าง เพื่อให้เข้าใจถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อคำตอบที่ได้จากแบบจำลอง และแนวโน้มความสัมพันธ์ระว่างค่าปัจจัยเหล่านี้กับผลคำตอบ ซึ่งโปรแกรมต้นแบบสำหรับการสร้างแผนการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้ สามารถเผยแพร่และพร้อมติดตั้งใช้ในบริษัทก่อสร้างที่สนใจ

ขั้นตอนที่ 4: เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยนี้สู่องค์ความรู้ส่วนรวมในที่ประชุมและวารสารทางวิชาการต่าง ๆ ทั้งระดับชาติและนานาชาติ รวมทั้งเป็นแหล่งเผยแพร่การใช้ประโยชน์จากงานวิจัยนี้ให้กับอุตสาหกรรมการก่อสร้างของประเทศ

วิธีการ: นำองค์ความรู้ใหม่จากผลการดำเนินโครงการวิจัยนี้ออกเผยแพร่สู่สาธารณะทั้งในและนอกประเทศ โดยการเขียนบทความทางวิชาการจากการวิเคราะห์ปัญหา สร้างแบบจำลองของปัญหาการตัดและริเริ่มวิธีการวางแผนการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นที่พัฒนาให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น และความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ของลักษณะคละของโจทย์ปัญหากับปริมาณเศษการตัดที่เกิดขึ้น ทำให้สามารถพัฒนากลยุทธ์การกำหนดงานการตัด (job lot) เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีกว่าที่ทำให้ลดความสูญเสียจากการตัดได้มากขึ้น โดยมุ่งหมายให้ได้บทความตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ และนำเสนอบทความในการประชุมทางวิชาการระดับประเทศหรือต่างประเทศ อย่างน้อย 1 เรื่อง รวมทั้งเผยแพร่โปรแกรมต้นแบบนี้สู่ผู้ที่สนใจทั่วไป ทั้งยังเป็นแหล่งข้อมูลความช่วยเหลือและสนับสนุนให้บริษัทก่อสร้างที่สนใจได้นำผลที่ได้จากโครงการวิจัยนี้ไปใช้

ตารางที่ 1.2 แผนงานโครงการวิจัย

รายการกิจกรรม	ระยะเวลา (เดือน)	ไตรมาสที่							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1. ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง	9								
2. คิดค้นพัฒนาแบบจำลองปัญหาและวิธีการหาคำตอบที่ดีขึ้น	6								
3. พัฒนาโปรแกรมต้นแบบ และทดสอบประเมินผล	8								
4. เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัย	4								

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

ผลจากโครงการวิจัยนี้อันจะเป็นประโยชน์ต่อธุรกิจการก่อสร้าง คือจะช่วยให้สามารถหาคำตอบของแผนการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นที่ดี พัฒนากลยุทธ์ในการกำหนดขนาดล็อตของงานการตัดแต่ละงานเพื่อให้เกิดลักษณะคละของโจทย์ปัญหาที่เหมาะสมที่ลดการเหลือเศษลงได้มากกว่าเดิม รวมทั้งได้ลำดับการตัดรูปแบบการตัดต่าง ๆ เพื่อให้เกิดความต่อเนื่องในงานการตัดและใช้พื้นที่ทำงานน้อยที่สุด ซึ่งจะเป็นการใช้ทรัพยากรให้เกิดคุณค่ามากที่สุด และช่วยประหยัดต้นทุนในงานก่อสร้าง เนื่องจากวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นมีอยู่หลากหลายประเภทและเป็นวัสดุหลักในงานก่อสร้าง โดยเฉพาะเมื่อแนวโน้มราคาค่าวัสดุก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อเศษวัสดุก่อสร้างน้อยลงยังทำให้ปัญหา

ขยะจากงานก่อสร้างลดลง หรือปัญหาเศษวัสดุก่อสร้างสูญหายลดลงด้วย นอกจากนี้ยังช่วยให้เข้าใจปัจจัยต่าง ๆ ของโจทย์ปัญหาที่มีผลต่อคำตอบที่ได้ ซึ่งจะทำให้สามารถรู้แนวทางการนำแบบจำลองที่สร้างขึ้นไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งผลงานที่เป็นรูปธรรมของโครงการวิจัยคือโปรแกรมต้นแบบที่สามารถเผยแพร่ไปสู่ผู้ที่สนใจทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับธุรกิจก่อสร้างของประเทศ

องค์ความรู้ที่ได้จากโครงการวิจัยอันจะเป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการ คือแบบจำลองปัญหาการตัดวัสดุเชิงเส้นที่พัฒนาสำหรับงานก่อสร้างโดยเฉพาะ ซึ่งจะรวมเอาข้อเงื่อนไขต่าง ๆ จากสภาพการปฏิบัติงานก่อสร้างจริงไว้ รวมทั้งประเด็นความต่อเนื่องของการตัด (contiguity) และวิธีการหาคำตอบที่เป็นแผนการตัดใหม่ที่มีประสิทธิภาพดีขึ้นสำหรับการแก้ปัญหาการตัดวัสดุเชิงเส้นนี้ รวมทั้งความเข้าใจในลักษณะคละของโจทย์ปัญหาที่มีผลต่อปริมาณเศษการตัดที่ได้ โดยทำให้เกิดการพัฒนาต่อยอดจากที่มีอยู่เดิม

บทที่ 2 ปัญหาการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้น

เนื้อหาในบทนี้เป็นการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้น ซึ่งจัดเป็นปัญหาในแขนงการตัดวัสดุคงคลัง 1 มิติ หรือ one dimensional cutting stock problem (1D-CSP) ซึ่งจะให้รายละเอียดทั้งภาพกว้างของโครงสร้างปัญหาการตัดและการบรรจุที่เป็นกลุ่มปัญหาใหญ่อันหนึ่ง และรายละเอียดของแบบจำลองทั่วไปของปัญหาการตัดวัสดุคงคลัง วิธีการต่าง ๆ ที่ใช้หาคำตอบที่ดีที่สุด รวมทั้งแนวคิดการนำข้อจำกัดส่วนเพิ่มของปัญหามาพิจารณารวมไว้ในแบบจำลอง

2.1 โครงสร้างของปัญหาการตัดและการบรรจุ

ปัญหาการตัด (cutting problems) และปัญหาการบรรจุ (packing problems) มีลักษณะร่วมทั่วไปที่เหมือนกัน คือมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนอันได้แก่ ชุดของวัสดุขนาดใหญ่ (large objects) ที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุอุปทาน (supply หรือ input) หรือวัสดุคงคลัง (stock) และชุดของวัสดุขนาดเล็ก (small items) ที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุอุปสงค์ (demand หรือ output) ซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งวัสดุใน 1, 2, 3 มิติ หรือมากกว่านั้น โดยการคัดแยกวัสดุขนาดเล็กทั้งหมดหรือบางส่วน ออกเป็นกลุ่มเพื่อหาการมอบหมายแต่ละกลุ่มนี้ให้กับวัสดุขนาดใหญ่แต่ละชิ้นอย่างเฉพาะเจาะจง โดยมีเงื่อนไขทั่วไปว่าวัสดุขนาดเล็กทั้งหมดในแต่ละกลุ่มจะต้องวางอยู่ภายใน (ห้ามเกินกว่า) วัสดุขนาดใหญ่แต่ละชิ้นเท่านั้น และวัสดุขนาดเล็กภายในกลุ่มจะต้องไม่มีขนาดส่วนที่ซ้อนทับกัน โดยทั่วไปปัญหาการตัดและการบรรจุ (cutting and packing problems) นี้จะประกอบขึ้นจากปัญหาย่อย ๆ 5 ปัญหาหรือ 5 ขั้นตอนที่ต้องพิจารณาเพื่อให้ได้คำตอบของปัญหาหลัก ซึ่งได้แก่ การคัดเลือกชิ้นวัสดุขนาดใหญ่ การคัดเลือกชิ้นของวัสดุขนาดเล็ก การจัดกลุ่มวัสดุขนาดเล็กที่คัดเลือกมาแล้วนั้น การมอบหมายกลุ่มของวัสดุขนาดเล็กนั้นให้กับวัสดุขนาดใหญ่ที่เลือกไว้แล้ว และการจัดตำแหน่งของวัสดุขนาดเล็กภายในวัสดุขนาดใหญ่แต่ละอันที่ได้มอบหมายกันไว้แล้ว

ลักษณะทั่วไปได้ถูกกำหนดไว้อย่างกว้าง ๆ ดังกล่าวนี้ จึงทำให้ปัญหาการตัดและการบรรจุสามารถแตกแขนงออกไปได้หลากหลายประเภท ซึ่งครอบคลุมการประยุกต์ใช้ไปในหลายอุตสาหกรรม ซึ่ง Dyckhoff (1990) ได้ริเริ่มวิธีการจัดจำแนกประเภทแขนงสาขาของปัญหาการตัดและการบรรจุไว้อย่างละเอียดและถูกนำไปใช้อ้างอิงอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามงานวิจัยถัดมาโดย Wäscher et al. (2007) ได้ทำการปรับปรุงวิธีการจัดจำแนกประเภทใหม่ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นซึ่งรายละเอียดจะนำมาทบทวนไว้ดังต่อไปนี้ การจำแนกด้วยการใช้ลักษณะเฉพาะที่สำคัญ 5 ประการ

1. มิติของวัสดุ (dimensionality) ซึ่งสามารถพิจารณาปัญหาของวัสดุได้ใน 1 มิติ (เชิงเส้น), 2 มิติ (พื้นผิว แผ่น พื้นที่), และ 3 มิติ (รูปทรง ปริมาตร), หรือในบางกรณีก็อาจเป็นวัสดุที่มากกว่า 3 มิติก็ได้

2. ลักษณะการมอบหมาย (kind of assignment) ระหว่างวัสดุขนาดใหญ่ (large objects) กับวัสดุขนาดเล็ก (small items) แบ่งเป็น 2 รูปแบบคือ

- Output value maximization คือ การมอบหมายที่มี large objects ไม่เพียงพอสำหรับ small items ทั้งหมด ดังนั้น large objects ทั้งหมดจะต้องถูกใช้ จึงเสมือนไม่ต้องคัดเลือก ทั้งนี้ประเด็นสำคัญคือการคัดเลือก small items ที่จะนำมามอบหมายให้กับ larger objects เพื่อให้เกิดเป็นผลลัพธ์สูงที่สุดของการมอบหมาย

- Input value minimization คือ การมอบหมายที่มี large objects มากเพียงพอสำหรับ small items ทั้งหมด ดังนั้น small items ทั้งหมดจะต้องถูกนำไปจัดเป็นกลุ่มย่อย ๆ จึงเสมือนไม่ต้องคัดเลือก small items จากนั้นจึงถูกมอบหมายให้กับ large objects ที่ชิ้นต่าง ๆ คัดเลือกไว้ เพื่อให้กลุ่มย่อยเหล่านี้ให้เกิดการใช้ large objects ที่น้อยที่สุด

ทั้งนี้คำว่า “value” เป็นคำกว้าง ๆ ที่อาจหมายถึง ต้นทุน กำไร หรือปริมาณวัสดุ ก็ได้

3. ขนาดคละของวัสดุขนาดเล็ก (assortment of small items) ลักษณะขนาดคละของวัสดุขนาดเล็กที่ทำหน้าที่เป็นอุปสงค์ของปัญหา สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะคือ

- Identical small items หมายถึง วัสดุขนาดเล็กที่ต้องการมีขนาดเท่ากันทั้งหมด ทั้งนี้คำว่า “ขนาด” ขึ้นกับมิติของปัญหา เช่น หากเป็นปัญหา 1 มิติจะหมายถึงความยาว หรือ 2 มิติจะหมายถึงความกว้างและความยาว และรูปร่างที่เหมือนกัน (congruent shapes)

- Weakly heterogeneous assortment หมายถึง วัตถุขนาดเล็กที่มีขนาดต่างกันเพียงไม่กี่ขนาด แต่ละขนาดมีเป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามไม่มีการกำหนดจำนวนที่ชัดเจนว่าเท่าใดจึง “ไม่กี่ขนาด” และ “จำนวนมาก” เพียงแต่กำหนดจำนวนในลักษณะที่สัมพันธ์เทียบกัน “in relation to”

- Strongly heterogeneous assortment หมายถึง มีวัตถุขนาดเล็กที่มีขนาดหลากหลายต่าง ๆ กันจำนวนมาก ในขณะที่แต่ละขนาดมีจำนวนเพียงไม่กี่ชิ้นหรืออาจมีเป็นจำนวนมาก ซึ่งสัดส่วนจำนวนที่ต้องการของแต่ละขนาดต่าง ๆ เหล่านี้ควรใกล้เคียงกัน (uniformly) สำหรับปัญหาแบบพื้นฐาน อย่างไรก็ตามหากสัดส่วนของจำนวนที่ต้องการของแต่ละขนาดต่างกันมาก (บางขนาดต้องการจำนวนมากแต่บางขนาดต้องการเพียงเล็กน้อย) (strongly varying demands) จะจัดเป็นปัญหาแบบพิเศษ

4. ขนาดคละของวัสดุขนาดใหญ่ (assortment of large objects) ลักษณะขนาดคละของวัสดุขนาดใหญ่ที่ทำหน้าที่เป็นอุปทานของปัญหา สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ

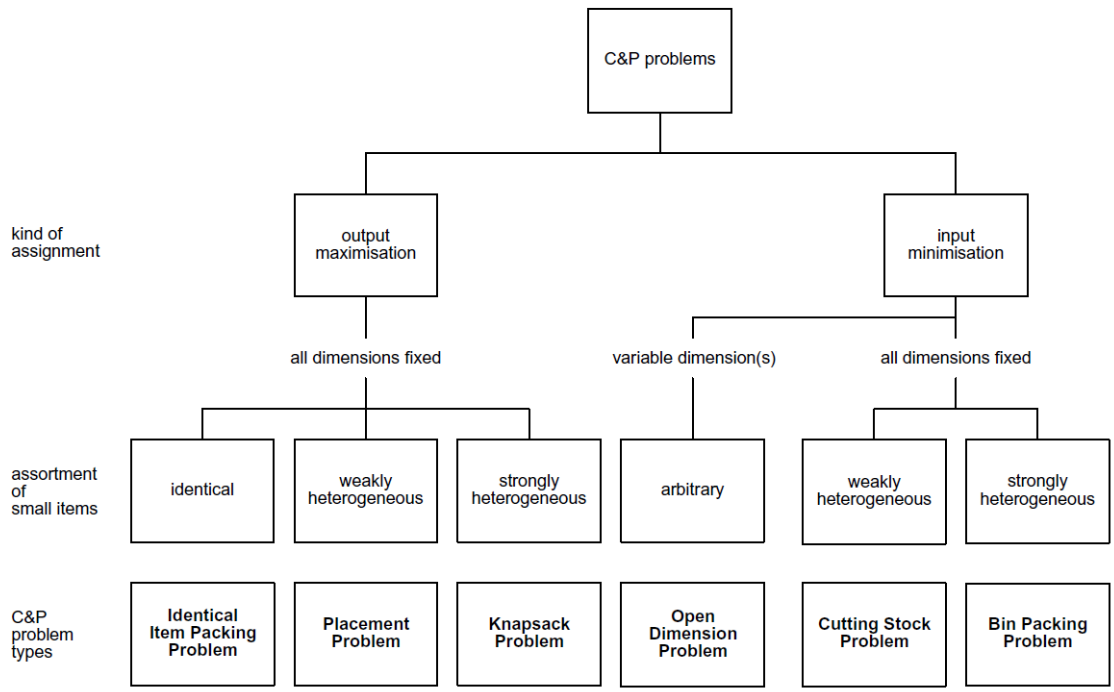
- One large object ซึ่งถูกกำหนดขนาดมิติต่าง ๆ ไว้แน่ชัดแล้วทุกมิติ หรืออาจมีบางมิติที่ยังไม่ได้กำหนดขนาด

- Several large objects ซึ่งมิติทั้งหมดถูกกำหนดขนาดไว้แล้ว สามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะขนาดคละเป็น identical large objects, weakly heterogeneous assortment, และ strongly heterogeneous assortment

5. รูปร่างของวัสดุขนาดเล็ก (shape of small items) ในกรณีที่เป็นวัสดุ 2 มิติ หรือ 3 มิติ อาจมีรูปร่างเป็นทรงเรขาคณิต เช่น สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม วงกลม ทรงกระบอก ทรงกลม ปริซึม หรือมีรูปร่างแบบไม่เป็นทรงเรขาคณิต ทั้งนี้อาจใช้รูปร่างเพียงรูปร่างเดียว หรือหลากหลายรูปร่างผสมกันก็ได้

เมื่อนำเอาลักษณะเฉพาะทั้ง 5 ประการนี้ มาใช้จำแนกปัญหาออกเป็นประเภทต่าง ๆ กันได้ ซึ่งจัดระดับความซับซ้อนของการจำแนกได้ 3 ขั้นคือ ระดับพื้นฐาน ระดับกลาง และระดับสูง

1. ประเภทของปัญหาที่จำแนกแบบระดับขั้นพื้นฐาน จะใช้ลักษณะเฉพาะ 2 ประการคือ ลักษณะของการมอบหมาย (kind of assignment) และขนาดคละของวัสดุขนาดเล็ก (assortment of small items) ซึ่งจะทำให้ได้ประเภทของปัญหาต่าง ๆ ออกมา 6 ประเภท ที่เป็นปัญหาพื้นฐานที่เป็นที่รู้จักกัน ดังนี้



รูปที่ 2.1 การจำแนกประเภทของปัญหาในระดับขั้นพื้นฐาน (ที่มา Wascher 2007)

- Identical item packing problem

- Placement problem

- Knapsack problem

- Open dimension problem

- Cutting stock problem (CSP)

- Bin packing problem (BPP)

2. ประเภทของปัญหาที่จำแนกแบบระดับขั้นกลาง เกิดจากการจำแนกปัญหาในระดับพื้นฐานที่มีอยู่แล้วออกไปอีกหนึ่งระดับชั้น ด้วยการใช้ลักษณะเฉพาะคือ ขนาดคละของวัสดุขนาดใหญ่ (assortment of large objects) ทำให้ได้ประเภทปัญหาแตกแขนงย่อยออกมาอีกเป็นจำนวนมากดังนี้

characteristics of the large objects \ assortment of the small items		identical	weakly heterogeneous	strongly heterogeneous
all dimensions fixed	one large object	Identical Item Packing Problem IIPP	Single Large Object Placement Problem SLOPP	Single Knapsack Problem SKP
	identical		Multiple Identical Large Object Placement Problem MILOPP	Multiple Identical Knapsack Problem MIKP
	heterogeneous		Multiple Heterogeneous Large Object Placement Problem MHLOPP	Multiple Heterogeneous Knapsack Problem MHKP

(a). กลุ่มปัญหาประเภท output maximization

<table>
<tr><td colspan="2">assortment of small items
characteristics of large objects</td><td>weakly heterogeneous</td><td>strongly heterogeneous</td></tr>
<tr><td rowspan="3">all dimensions fixed</td><td>identical</td><td>Single Stock Size Cutting Stock Problem

SSSCSP</td><td>Single Bin Size Bin Packing Problem

SBSBPP</td></tr>
<tr><td>weakly heterogeneous</td><td>Multiple Stock Size Cutting Stock Problem

MSSCSP</td><td>Multiple Bin Size Bin Packing Problem

MBSBPP</td></tr>
<tr><td>strongly heterogeneous</td><td>Residual Cutting StockProblem

RCSP</td><td>Residual Bin Packing Problem

RBPP</td></tr>
<tr><td colspan="2">one large object

variable dimension(s)</td><td colspan="2">Open Dimension Problem

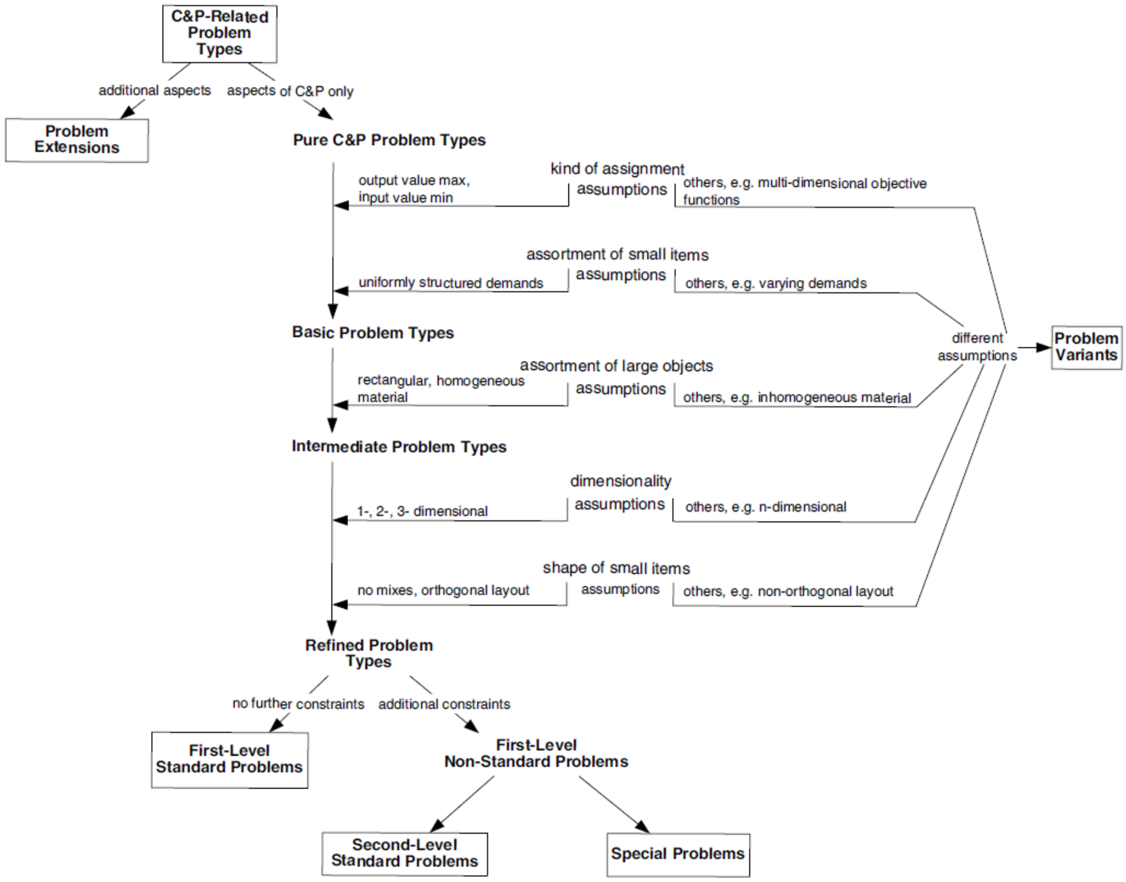
ODP</td></tr>
</table>

(b). กลุ่มปัญหาประเภท input minimization

รูปที่ 2.2 การจำแนกประเภทของปัญหาในระดับขั้นกลาง (ที่มา Wascher 2007)

ซึ่งจะเห็นว่าการแบ่งประเภทปัญหาให้ระดับขั้นกลางทำให้ได้ปัญหาประเภทย่อย ๆ ออกมาอีกจำนวนมาก นอกจากนี้หากยังคงแบ่งต่อไปอีกขั้นเป็นระดับขั้นสูงก็จะทำให้ได้ประเภทประเภทย่อยที่มีความเฉพาะตัวสูง

3. ประเภทของปัญหาที่จำแนกแบบระดับขั้นสูง เป็นการจำแนกที่จะทำให้ได้ประเภทปัญหาที่มีความเฉพาะเจาะจงอย่างยิ่ง โดยจะใช้ลักษณะเฉพาะอีก 2 ประการคือ มิติของวัสดุ (dimensionality) และรูปร่างของวัสดุขนาดเล็ก (shape of small items) ในการจำแนก ซึ่งโครงสร้างของการจำแนกปัญหาออกเป็นประเภทย่อย ๆ ด้วยลักษณะเฉพาะทั้ง 5 ประการนี้ สามารถแสดงด้วยแผนภาพแนวคิดดังนี้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างการจำแนกประเภทปัญหาการตัดและการบรรจุตามระดับขั้น (ที่มา Wascher 2007)

จากการทบทวนโครงสร้างของกลุ่มปัญหาการตัดและการบรรจุพบว่า เป็นกลุ่มปัญหาที่มีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนมาก มีงานวิจัยที่ผ่านมากเป็นจำนวนมากและยาวนาน ซึ่งปัญหาการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นที่เป็นเป้าหมายของการวิจัยนี้ เป็นเพียงแขนงปัญหาย่อยในประเภทที่เรียกว่า One dimensional – single stock size – cutting stock problem (1D-SSS-CSP) หรือ One dimensional – single bin size – bin packing problem (1D-SBS-BPP) ขึ้นอยู่กับดีกรีของขนาดคละของวัสดุขนาดเล็ก (ขนาดความยาวท่อนที่ต้องการใช้) ซึ่งหากพิจารณาลักษณะขนาดคละของวัสดุขนาดเล็กที่เป็นอุปสงค์แล้วจะพบว่า ในงานก่อสร้างจะมีขนาดคละของความต้องการที่หลากหลายที่อาจจัดได้อยู่ในช่วงระหว่าง weakly heterogeneous ถึง strongly heterogeneous assortment อย่างไรก็ตามไม่มีตัวเลขที่ใช้ในการจำแนกดีกรีของขนาดคละที่แน่ชัด แต่เป็นเพียงจำนวนในเชิงสัมพันธ์กันเท่ากัน แต่เพื่อความสะดวกของจะใช้ชื่อ 1D-SSS-CSP แทนความคลุมเครือดังกล่าว ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจึงทำการทบทวนแบบจำลองทั่วไปของปัญหา 1D-SSS-CSP อย่างละเอียดเพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้สำหรับปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นต่อไป

2.2 แบบจำลองทั่วไปของปัญหา 1D-SSS-CSP

แบบจำลองทั่วไปของปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นที่ใช้วัสดุคงคลังขนาดเดียว หรือ One dimensional - single stock size - cutting stock problem (1D-SSS-CSP) หรืออาจเรียกสั้น ๆ ว่า 1D-CSP คือปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้น (1 มิติ) (หรือวัสดุขนาดใหญ่) ที่มีขนาดความยาวมาตรฐานเพียงขนาดเดียวและมีอยู่จำนวนมากเกินพอ ออกเป็นท่อนความยาวที่สั้นลง (หรือวัสดุขนาดเล็ก) ให้ได้ขนาดความยาวและจำนวนครบถ้วนตามที่ต้องการ โดยที่ได้ค่าตามวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดด้วย ตัวอย่างเช่น เกิดเศษการตัดน้อยที่สุด เกิดค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด หรือใช้วัสดุคงคลังจำนวนน้อยที่สุด

คำตอบของปัญหานี้ คือแผนการตัด (cutting plan) ที่กำหนดกลุ่มของรูปแบบการตัด (cutting patterns) และจำนวนครั้งของการตัดแต่ละรูปแบบเหล่านี้ (เรียกว่าเป็นวิธีการหาคำตอบแบบอิงรูปแบบ หรือ cutting pattern oriented approaches) เพื่อให้ได้ท่อนทั้งหมดครบถ้วนตามความต้องการ ซึ่งรูปแบบการตัดหมายถึงแบบการตัดวัสดุขนาดเล็กท่อนต่าง ๆ จากวัสดุขนาดใหญ่ 1 เส้น โดยรูปแบบการตัดแต่ละแบบที่ต่าง ๆ กันจะเป็นการตัดท่อนที่ความยาวต่าง ๆ กันเป็นจำนวนต่าง ๆ กัน ทั้งนี้จะต้องมีผลรวมความยาวไม่เกินกว่าความยาวมาตรฐาน

สัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์ที่ใช้มีดังต่อไปนี้

ดัชนี:

i คือ ประเภทของท่อนที่ต้องการ (วัสดุขนาดเล็ก)

j คือ ดัชนีของรูปแบบการตัด

วัสดุคงคลัง:

LS คือ ความยาวของวัสดุคงคลัง

ท่อนที่ต้องการ:

L_i คือ ความยาวของท่อนที่ต้องการประเภทที่ i

D_i คือ จำนวนที่ต้องการของท่อนประเภทที่ i

m คือ จำนวนทั้งหมดของขนาดความยาวที่ต่างกันของท่อนที่ต้องการ

รูปแบบการตัด:

P_j คือ รูปแบบการตัดที่ j

A_{ij} คือ จำนวนการตัดท่อนประเภทที่ i ในรูปแบบการตัดที่ j

X_j คือ จำนวนครั้งของการตัดตามรูปแบบการตัดที่ j

T_j คือ เศษเหลือของรูปแบบการตัดที่ j

n คือ จำนวนรูปแบบการตัดทั้งหมดที่ใช้ในคำตอบ

กลุ่มจำนวน:

($L_1, L_2, ..., L_i, ..., L_m$) คือ กลุ่มของความยาวต่าง ๆ กันของท่อนที่ต้องการ

($D_1, D_2, ..., D_i, ..., D_m$) คือ กลุ่มของจำนวนของท่อนที่ต้องการ

$P_j = (A_{1j}, A_{2j}, ..., A_{ij}, ..., A_{mj})$ คือ รูปแบบการตัดที่ j

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งปรับปรุงจาก Gilmore and Gomory 1963 สามารถเขียนได้ดังนี้

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์: $Minimize\ \sum_j(X_j)$

ตัวแปรตัดสินใจ: X_j

เงื่อนไขข้อจำกัด: ข้อจำกัดด้านความต้องการ: $\sum_j(A_{ij}X_j) \geq D_i$ สำหรับ i ตั้งแต่ 1 ถึง m

และข้อจำกัดจำนวนเต็มบวก: $X_j \geq 0$ และ $X_j \in \mathbb{N}$

โดยที่ รูปแบบการตัดที่เป็นไปได้ใด ๆ (feasible cutting patterns) ที่นำมาใช้จะต้องไม่เกินกว่าความยาวของวัสดุคงคลัง: $\sum_i A_{ij}L_i \leq LS$ สำหรับ j ตั้งแต่ 1 ถึง n

และเศษการตัดของรูปแบบการตัดที่ j หรือ $T_j = LS - \sum_i A_{ij}L_i$ โดยที่รูปแบบการตัดที่ดี (มีประสิทธิภาพ) จะต้องมีเศษการตัดสั้นกว่าความยาวของท่อนที่ต้องการที่สั้นที่สุด หรือ $0 < T_j < Min\,[L_i]$ (Vahrenkamp 1996)

กลุ่มปัญหาทั้งสองนี้จัดเป็นปัญหาประเภท NP-hard (nondeterministic polynomial-time hard) ซึ่งหมายความว่าเป็นปัญหาที่จะต้องใช้เวลาโพลิโนเมียลเพื่อที่จะพิจารณาคำตอบทุกคำตอบที่เป็นไปได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออัตราส่วนโดยเฉลี่ย $LS/L_i < 5$ จะเป็นปัญหาที่ยากที่จะแก้ ซึ่งการประยุกต์ใช้ปัญหาทั้งสองกลุ่มนี้ในการแบบจำลองปัญหาการปฏิบัติงานต่าง ๆ มีอยู่อย่างกว้างขวาง (Gupta and Ho 1999) ได้แก่ ปัญหาการบรรจุภัณฑ์หรือการโหลดสินค้าขึ้นรถบรรทุก ปัญหาในวงการวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์เช่น table formatting, pre-paging และ file allocation ปัญหาในอุตสาหกรรมการผลิตสินค้าต่าง ๆ เช่น กระดาษ รวมทั้งการประยุกต์ใช้กับปัญหาการใช้วัสดุก่อสร้างเชิงเส้น

วิธีการหาคำตอบแบบโปรแกรมเชิง (LP) เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับปัญหาในระดับ “ง่าย” คือปัญหาที่มีความต้องการความยาวของวัสดุหลากหลายขนาดและเป็นท่อนสั้น ๆ เนื่องจากปัญหาแบบนี้จะทำให้มีคำตอบที่เป็นไปได้จำนวนมาก คำตอบที่ไม่เป็นจำนวนเต็มจึงมีโอกาสหาได้ใกล้เคียงกับคำตอบที่เป็นจำนวนเต็ม อย่างไรก็ตาม หากว่าความยาวที่ต้องการของวัสดุมีเพียงไม่กี่ขนาดและเป็นท่อนยาว ๆ จะจัดว่าเป็นปัญหาระดับ “ยาก” ซึ่งมักจะไม่สามารถหาคำตอบที่ดีได้ด้วยวิธี LP (Hinterding et al. 1994)

2.3 การหาคำตอบที่ดีที่สุด

วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นจำนวนมากซึ่งสามารถแบ่งตามลักษณะของผลคำตอบที่ได้ออกเป็น 2 ประเภทหลัก (Scholl et al., 1997) คือวิธีการในการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบแท้จริง (exact algorithms) และแบบประมาณ (approximation algorithms) เนื่องจากปัญหา 1D-CSP จัดเป็น NP-complete optimization problem (Gradisar et al. 1999) ทำให้การหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบแท้จริงอาจเป็นไปไม่ได้กับปัญหาที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน ดังนั้นการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบประมาณจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมกว่า นอกจากนี้ความหลากหลายของปัจจัยต่าง ๆ ที่เป็นคุณลักษณะของปัญหาอาจทำให้ถูกแบ่งออกเป็นประเภทย่อย ๆ ได้อีก ตัวอย่างเช่น ดีกรีของขนาดความคละของท่อนที่ต้องการ จึงทำให้แนวทางการหาคำตอบที่ดีที่สุดเป็นไปได้หลายแนวทางและใช้ได้ผลดีต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวปัญหานั้น (Dyckhoff 1990; Gradisar et al. 1999) อย่างไรก็ตามแนวทางการหาคำตอบอาจแบ่งออกอย่างกว้าง ๆ ได้สองแนว ได้แก่ item-oriented approach ซึ่งจะพิจารณาจากรายการท่อนความยาวที่ต้องการ (items) เป็นรายตัวไล่ไปจนครบทั้งหมด และ pattern-oriented approach ซึ่งจะแบ่งขั้นตอนการหาคำตอบเป็นสองระยะคือ เริ่มจากการสร้างรูปแบบการตัดก่อน (cutting patterns) จากนั้นจึงนำรูปแบบการตัดเหล่านี้มาหาจำนวนครั้งของการตัดซ้ำให้ได้จำนวนตามที่ต้องการ

1. แนวทาง item-oriented approach จะเหมาะกับปัญหาที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอหรือไม่มีระเบียบแบบแผน (irregular) เช่น มีวัสดุคงคลังหลากหลายขนาด มีวัสดุคงคลังจำนวนไม่เพียงพอ มีท่อนความต้องการที่มีความยาวหลากหลายขนาดมากและมีความต้องการแต่ละขนาดจำนวนไม่มาก ซึ่งวิธีการหาคำตอบที่จะนำมาทบทวนไว้ในบทนี้จะเป็น simple heuristic algorithms หรือที่เรียกว่า bin packing-algorithms และ custom heuristic algorithms (Gradisar et al. 1999; Cherri et al. 2009)

2. แนวทาง pattern-oriented approach ซึ่งเป็นแนวทางที่งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่มุ่งเน้น เช่น งานวิจัยที่ถูกอ้างอิงอย่างกว้างขวางของ (Gilmore and Gomory 1961; Gilmore and Gomory 1963) อย่างไรก็ตามวิธีการหาคำตอบในกลุ่มนี้มักจะได้ผลดีเมื่อวัสดุคงคลังมีขนาดเท่ากันหรือมีขนาด

มาตรฐานกำหนดไว้ โดยแบ่งการหาคำตอบออกเป็นสองขั้นตอนคือ เริ่มจากการสร้างรูปแบบการตัดที่ดีขึ้นก่อน เพื่อเป็นตัวกำหนดจำนวนการตัดท่อนความยาวขนาดต่าง ๆ จากวัสดุคงคลังหนึ่งเส้น จากนั้นจึงเป็นการหาจำนวนครั้งการตัดซ้ำตามรูปแบบการตัดแต่ละรูปแบบเหล่านั้น ซึ่งภารกิจการสร้างรูปแบบการตัดที่ดีนั้นมีหลายวิธีการ ที่จะนำมาทบทวนไว้ได้แก่ algorithm สำหรับการสร้างรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพที่ริเริ่มขึ้นโดย Pierce (1964) ซึ่งเป็นการใช้ heuristic เพื่อสร้างรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้ขึ้นมาอย่างเป็นระบบ และ Random search algorithm ที่พัฒนาขึ้นโดย Vahrenkamp (1996) ซึ่งเป็นการใช้หลักการสุ่มเพื่อสร้างรูปแบบการตัดที่สอดคล้องตามเงื่อนไขที่ยอมรับได้ที่กำหนดไว้ให้

เมื่อได้รูปแบบการตัดแล้ว ภารกิจต่อไปของแนวทาง pattern-oriented approach คือการหาจำนวนการการตัดซ้ำของรูปแบบการตัดเหล่านั้น สำหรับ 1D-CSP สามารถพิจารณาเป็น integer linear programming problem โดยที่ตัวแปรคำตอบ X_j ก็คือจำนวนครั้งของการตัดรูปแบบการตัดที่ j ซึ่งคำตอบต้องเป็นเซตของจำนวนเต็มที่มากกว่าเท่ากับศูนย์ (Gilmore and Gomory 1961) ซึ่งตัวแบบจำลองของปัญหามีสองปัจจัยหลักสำคัญที่เป็นสาเหตุให้การหาคำตอบของปัญหาเป็นไปได้ยาก ปัจจัยแรกคือจำนวนรูปแบบการตัดทั้งหมด (n) ซึ่งอาจมีรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้อยู่เป็นจำนวนมากมายมหาศาล (Pierce 1964) ในขณะที่จำนวนทั้งหมดของขนาดความยาวที่ต่างกันของท่อนที่ต้องการ (m) อยู่ในขนาดที่สมเหตุสมผลในทางปฏิบัติ หรือความยาวของท่อนที่ต้องการเป็นขนาดสั้น ๆ (small L_i) จำนวนมาก ส่งผลทำให้ขนาดของแบบจำลองใหญ่มาก และปัจจัยที่สองคือข้อจำกัดด้านเลขจำนวนเต็มของคำตอบ

เนื่องจากคำตอบที่ดีที่สุด (optimal solutions) ที่เป็นเลขจำนวนเต็มสามารถหาได้เพียงในกรณีที่ m มีค่าไม่มาก (ส่งผลให้ n มีค่าไม่มาก) และอาจจะน้อยกว่าตัวเลขที่เป็นจริงในทางปฏิบัติ แนวทางการหาคำตอบจึงต้องอาศัยขั้นตอนแบบ heuristic เท่านั้น ซึ่งมีขั้นตอนแบบ heuristic อยู่สองวิธีที่เป็นที่นิยมใช้สำหรับ 1D-CSP (Haessler and Sweeney 1991) หรือใช้วิธีแบบ stochastic ได้แก่ Genetic Algorithm และ Evolutionary Algorithm โดยจะมีวิธีที่ถูกนำมาทบทวนดังต่อไปนี้

1. วิธีแรกใช้การผ่อนคลายข้อจำกัดด้านเลขจำนวนเต็ม (linear programming (LP) relaxation of the integer problem) เพื่อการหาคำตอบเบื้องต้นก่อน แล้วจึงทำการปรับปรุงคำตอบ (ที่ไม่เป็นเลขจำนวนเต็ม) ให้เป็นเลขจำนวนเต็มภายหลัง เรียกวิธีการนี้ว่า Delayed Pattern Generation Technique หรือ Column Generation Technique (Gilmore and Gomory 1961; 1963)

2. วิธีที่สองใช้การทยอยสร้างรูปแบบการตัดขึ้นตามลำดับ เพื่อให้ตอบสนองต่อความต้องการของปัญหาที่เหลืออยู่ในขณะนั้น เรียกว่า Sequential Heuristic Procedure (SHP) และจะจบขั้นตอนเมื่อความต้องการได้รับการตอบสนองครบถ้วนทั้งหมดแล้ว (Haessler and Sweeney 1991)

และ 3. วิธีแบบ Stochastic approach เป็นการหาคำตอบแบบประมาณโดยอาศัย algorithms ในการค้นหาคำตอบที่ดีที่อยู่ในเซตของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด ได้แก่ Genetic algorithms (Salem et al. 2007) และ Evolutionary algorithms (Liang et al. 2002) ข้อดีของวิธีการในกลุ่มนี้คือ สามารถพิจารณาปัญหาในลักษณะที่เป็น non-linear ที่อาจเป็นปัญหาย่อยที่ซ้อนอยู่ใน 1D-CSP ได้ด้วย ซึ่งเป็นข้อจำกัดของวิธี LP นอกจากนี้ยังมีข้อดีที่เหนือกว่าวิธีที่อิงกับ Heuristic rules เช่น SHP ที่มักจะให้คำตอบที่ดีได้ไม่สม่ำเสมอ แต่ขึ้นกับโจทย์ปัญหา (Liang et al. 2002)

2.3.1 Simple Heuristic Algorithms

Simple heuristic algorithms หรือ bin packing-algorithms ที่นำมาใช้ในการหาคำตอบแบบประมาณ (Coffman et al. 1984) โดยสมมติให้รายการท่อนความยาวที่ต้องการเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่ทราบค่า รายการท่อนความยาวเหล่านี้มีการเรียงลำดับไว้ก่อนแล้วและจะถูกพิจารณาเป็นรายตัวตามลำดับไปจนครบทั้งหมด จึงเป็นแนวการหาคำตอบแบบ item-oriented approach การเรียงลำดับรายการท่อนความยาวอาจใช้รูปแบบการเรียงลำดับแบบสุ่ม (random order) การเรียงลำดับจากความยาวน้อยไปมาก (ascending order) และการเรียงลำดับจากความยาวมากไปน้อย (descending order) ได้แก่ algorithms ต่อไปนี้

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 ต่าง ๆ 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

ในกรณีที่แบบจำลองปัญหา CSP มีขนาดใหญ่และซับซ้อน คือมีวัสดุคงคลังหลายขนาดความยาว หรือมีรายการขนาดท่อนความยาวที่ต้องการจำนวนมาก ซึ่งอาจทำให้ขนาดความยาวท่อนที่ยาวมากหรือยาวปานกลางที่อยู่ในลำดับหลัง ๆ ของรายการ 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 ในขณะที่ได้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีกับวิธีอื่น ๆ ความไม่แน่นอนของประสิทธิภาพของวิธีการหาคำตอบจึงอาจทำให้ต้องทำการหาคำตอบทั้ง 4 วิธี แล้วจึงนำมาประเมินเพื่อเลือกคำตอบที่ดีที่สุด

2.3.2 Efficient Feasible Cutting Patterns

Salem et al. (2007) ได้เสนอการสร้างรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพ (Efficient feasible cutting patterns) แบบต่าง ๆ กันจำนวนหนึ่ง ด้วย algorithm ที่ปรับปรุงมาจาก Pierce (1964) ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. ให้ทำการจัดเรียงรายการขนาดท่อนความยาวที่ต้องการตามลำดับจากความยาวมากไปหาน้อย (descending order)

2. รูปแบบการตัด (cutting pattern) ที่ j ใด ๆ

$$A_{1j} = min\left(\left[\frac{LS}{L_1}\right], D_1\right)$$

$$A_{2j} = min\left(\left[\frac{LS - A_{1j} \cdot L_1}{L_2}\right], D_2\right)$$

$$A_{mj} = min\left(\left[\frac{LS - \sum_i^{m-1} A_{ij} \cdot L_i}{L_m}\right], D_m\right)$$

3. จะได้รูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพที่ j ใด ๆ เป็น $P_j = (A_{1j}, A_{2j}, A_{3j}, \ldots, A_{mj})$

4. พิจารณารูปแบบการตัดที่ j, ค่าตัวเลข i ที่มากที่สุด, โดยที่ $1 \leq i \leq m-1$ และ $A_{ij} > 0$, ให้เท่ากับ k หากไม่มี k ให้จบการสร้างรูปแบบ

5. สำหรับ j = j+1 (รูปแบบการตัดถัดไป) 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}:

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

จำนวนท่อนตัดของ L_{k+2} ,....,

จำนวนท่อนตัดของ L_m:

$$a_{mj} = \min\left(\left\lfloor\frac{LS - \sum_{i}^{m-1} A_{ij} \cdot L_i}{L_m}\right\rfloor, D_m\right)$$

6. กลับไปทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 จนกระทั่งไม่มี k จะได้รูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพทั้งหมดออกมา

Algorithm นี้สามารถสร้างรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพขึ้นเป็นจำนวนมากจำนวนหนึ่งที่จะนำไปใช้ในการหาคำตอบด้วยแบบจำลองปัญหา 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 จะสามารถสร้างรูปแบบการตัดตาม algorithm ข้างบนได้ดังนี้

P_1 = (1, 0, 1, 0, 1)	P_9 = (0, 1, 0, 1, 3)	P_{17} = (0, 0, 1, 1, 5)
P_2 = (1, 0, 0, 2, 0)	P_{10} = (0, 1, 0, 0, 5)	P_{18} = (0, 0, 1, 0, 5)
P_3 = (1, 0, 0, 1, 2)	P_{11} = (0, 0, 3, 0, 1)	P_{19} = (0, 0, 0, 4, 2)
P_4 = (1, 0, 0, 0, 4)	P_{12} = (0, 0, 2, 2, 0)	P_{20} = (0, 0, 0, 3, 4)
P_5 = (0, 2, 0, 0, 0)	P_{13} = (0, 0, 2, 1, 2)	P_{21} = (0, 0, 0, 2, 5)
P_6 = (0, 1, 1, 1, 0)	P_{14} = (0, 0, 2, 0, 4)	P_{22} = (0, 0, 0, 1, 5)
P_7 = (0, 1, 1, 0, 2)	P_{15} = (0, 0, 1, 3, 1)	P_{23} = (0, 0, 0, 0, 5)
P_8 = (0, 1, 0, 2, 1)	P_{16} = (0, 0, 1, 2, 3)	

2.3.3 Random Search Algorithm

นอกจาก algorithm ที่ Pierce ได้เสนอขึ้นแล้ว Vahrenkamp (1996) ได้สร้าง algorithm เพื่อใช้ค้นหารูปแบบการตัดที่ดีด้วยการสุ่ม โดยผู้ใช้กำหนดขอบเขตของเศษการตัดที่ยอมรับได้ขึ้น (acceptable trim of a pattern: Tw) แล้วจึงให้ algorithm ดำเนินการสุ่มสร้างรูปแบบการตัดที่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่กำหนดให้ ซึ่ง Random Search algorithm จะมีข้อดีกว่าการใช้ algorithm ของ Pierce เนื่องจากสามารถคัดกรองให้ได้เฉพาะรูปแบบการตัดที่มีเกิดเศษที่ยอมรับได้เท่านั้น ทำให้รูปแบบการตัดที่ได้มีจำนวนน้อยลง

Random Search algorithm มีขั้นตอนดังแสดงในรูปแผนภาพข้างล่างนี้

โดยที่ให้ T_w คือ เศษการตัดที่ยอมรับได้จากรูปแบบการตัด

LS คือ ความยาวของวัสดุคงคลัง

L_i คือ ขนาดความยาวที่ต้องการ สำหรับ i ตั้งแต่ 1 ถึง m

D_i คือ จำนวนท่อนของความยาว L_i ที่ต้องการ

L_c คือ ความยาวปัจจุบันของวัสดุ

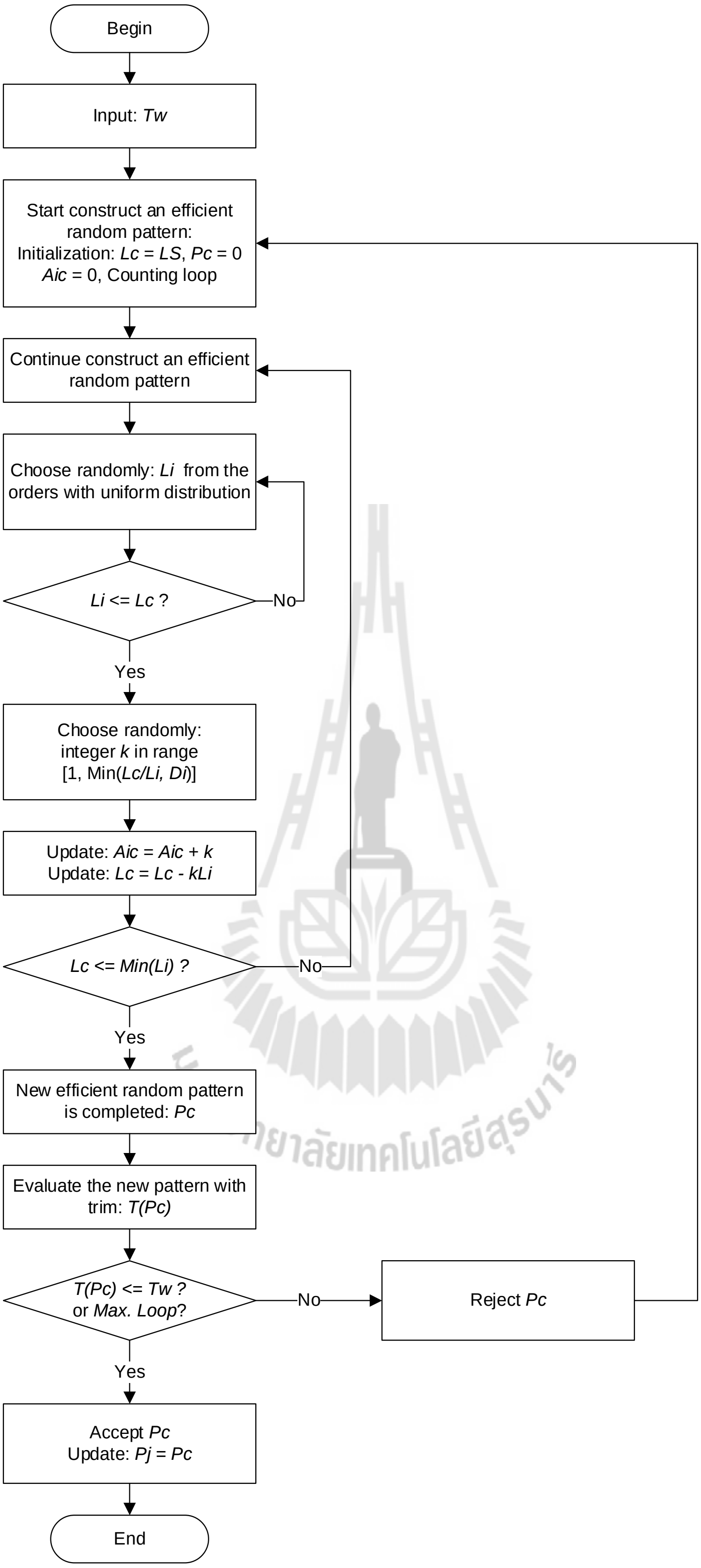
P_c คือ รูปแบบการตัดปัจจุบันที่กำลังสร้างที่ได้จากการสุ่ม

T_c คือ เศษการตัดปัจจุบันจากรูปแบบปัจจุบัน

A_{ic} คือ จำนวนท่อนของการตัดท่อนความยาว L_i ของรูปแบบการตัด P_c

Min (L_i) คือ ขนาดที่สั้นที่สุดของท่อนที่ต้องการ

$T(P_c)$ คือ เศษการตัดของรูปแบบการตัดปัจจุบัน P_c



รูปที่ 2.4 ลำดับขั้นตอน (Flowchart) ของ Random Search algorithm

2.3.4 Delayed Pattern Generation Technique

ตามแนวทางของการหาคำตอบด้วย pattern-based approach นั้นหลังจากที่ได้เตรียมกลุ่มของรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพดีไว้จำนวนหนึ่งแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการหาจำนวนครั้งของการตัดตามรูปแบบเหล่านั้น ซึ่งหาคำตอบได้จากการแก้ปัญหาแบบจำลอง Linear Programming (LP) เทคนิค Delayed Pattern Generation นี้สามารถอ้างย้อนกลับไปถึงงานของ Gilmore and Gomory (1961; 1963) ที่ได้ริเริ่มวิธีเพิ่มรูปแบบการตัดอันใหม่ถัดไปเข้าไปในแบบจำลองที่เป็น LP ที่ผ่อนคลายข้อจำกัดด้านคำตอบตัวเลขจำนวนเต็มไว้ (Linear Programming Relaxation of Integer Problem) ด้วยการพิจารณาแก้ปัญหาย่อยที่สัมพันธ์กันที่อยู่ในรูปแบบปัญหากระเป๋าเป้ (Knapsack problem) จึงทำให้สามารถแก้ปัญหา 1D-CSP ได้ด้วยแบบจำลอง LP โดยที่ไม่ต้องสร้างรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้ทั้งหมดออกมาก่อน หรือเป็นการควบคุมขนาดของตัวแปร n ไม่ให้มากเกินกว่าที่จะหาคำตอบได้ เทคนิคที่เรียกว่า Delayed Pattern Generation หรือ Column Generation (Bradley et al. 1977) นี้เป็นเทคนิคที่ช่วยในการหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ภายในเวลาที่สั้น และยังไม่ต้องนำรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้ทั้งหมดออกมาพิจารณา

ด้วยค่าตัวแปร n ที่ไม่มากเมื่อเทียบกับปัญหาที่พบในทางปฏิบัติ เช่น 15 อาจสามารถสร้างให้เกิดรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้ (feasible) จำนวนหลายล้านรูปแบบ การควบคุมค่าตัวแปร n เมื่อตอนเริ่มต้นการแก้ปัญหาจึงเป็นสิ่งที่สำคัญเพื่อไม่ให้มีจำนวนตัวแปรคำตอบ (decision variables) มากเกินไป นอกจากนี้การผ่อนคลายข้อจำกัดด้านคำตอบตัวเลขจำนวนเต็มยังทำให้การหาคำตอบที่ดีที่สุดทำได้รวดเร็วขึ้น และในกรณีที่จำนวนความต้องการ (D_i) เป็นตัวเลขมาก ๆ การปัดเศษทศนิยม (rounding) ของคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จาก LP เพื่อปรับปรุงให้เป็นตัวเลขจำนวนเต็มในท้ายที่สุด จะไม่เกิดผลกระทบมากนักโดยยังคงให้ค่าคำตอบที่ดีใกล้เคียงเดิม (Bradley et al. 1977)

แบบจำลองปัญหา LP relaxation of IP ของ 1D-CSP (อ้างอิงกับสมการและตัวแปรของแบบจำลอง 1D-CSP ที่แสดงข้างบน) ซึ่งเป็นรูปเต็มของปัญหาหรือ Master problem สามารถเขียนได้ดังนี้

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์: $Minimize\ Z = \sum_{j=1}^{n}(C_j X_j)$

ตัวแปรตัดสินใจ: X_j

เงื่อนไขข้อจำกัด:

- ข้อจำกัดด้านความต้องการ: $\sum_{j=1}^{n}(A_{ij} X_j) \geq D_i$ สำหรับ i ตั้งแต่ 1 ถึง m

- ข้อจำกัดจำนวนบวกและผ่อนคลายให้เป็นเลขจำนวนจริง: $X_j \geq 0$ สำหรับ j ตั้งแต่ 1 ถึง n และ $X_j \in \mathbb{R}$ โดยที่ $\mathbb{R}$ คือ เซตของจำนวนจริง

ถ้าให้ n เป็นค่ามาก ๆ จะไม่สามารถหาคำตอบของปัญหาข้างบนได้ด้วยวิธี Simplex method รวมทั้งอาจเป็นไม่ได้เลยที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์ A_{ij} ของรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้ออกมาทั้งหมด วิธี Column Generation จึงอาศัยการลดขนาดของปัญหาจริงลง (decomposition) และสร้างค่าสัมประสิทธิ์ A_{ij} ชุดใหม่ขึ้นเป็นคราวไปเฉพาะเมื่อต้องการเท่านั้น ในการลดขนาดของปัญหาลงหรือเสมือนการสมมติข้อจำกัดให้ว่า

$X_{J+1},\ X_{J+2}, X_{J+3}, \dots, X_n = 0$ และเป็น non-basic variables

ดังนั้นปัญหาจึงถูกลดรูปลงเหลือแค่ J มิติ หรือเรียกว่า Restricted master problem ซึ่งมีขนาดเล็กพอที่จะหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีปกติทั่วไปคือ simplex method มีรายละเอียดดังนี้

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์: $Minimize\ Z^J = \sum_{j=1}^{J}(C_j X_j)$

ตัวแปรตัดสินใจ: X_j

เงื่อนไขข้อจำกัด: $\sum_{j=1}^{J}(A_{ij} X_j) \geq D_i$ สำหรับ i ตั้งแต่ 1 ถึง m

$X_j \geq 0$ สำหรับ j ตั้งแต่ 1 ถึง J และ $X_j \in \mathbb{R}$

โดยที่หาก Restricted master problem นี้สามารถหาค่าคำตอบที่ดีที่สุดได้ และให้ π_i^J เป็น Optimum shadow prices ของฟังก์ชันข้อจำกัดสำหรับ i ตั้งแต่ 1 ถึง m คำตอบที่ดีที่สุด (optimal solution) ที่หาได้พร้อมกับค่า $X_{J+1},\ X_{J+2}, X_{J+3}, \dots, X_n = 0$ จะเป็นคำตอบหนึ่งที่เป็นไปได้และมีโอกาสจะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดของ Master problem ด้วย ถ้าหากว่าเงื่อนไขของ simplex optimality condition เป็นจริง ซึ่งก็คือ

$v^J \geq 0$ โดยที่ $v^J = \operatorname*{Min}_{1 \leq j \leq n}\left[C_j - \sum_{i=1}^{m} \pi_i^J A_{ij}\right]$; สำหรับทุก ๆ X_j

ซึ่งหากเงื่อนไขข้างบนนี้เป็นจริงจะได้ว่าคำตอบของ Restricted master problem ที่ได้แล้วเป็น optimal solution ของ Master problem ด้วย โดยที่ไม่ต้องบ่งชี้ A_{ij} ออกมาทั้งหมดอีกต่อไป หรือเรียกว่าได้ว่าสามารถแก้ปัญหาของ Master problem ได้แล้ว

แต่หากว่ามี X_j ใด สมมติให้เป็น X_s ที่ให้ค่า $v^J = C_s - \sum_{i=1}^{m} \pi_i^J A_{is} < 0$ จึงควรนำค่าตัวแปร X_s นี้เข้าไปเป็นตัวแปรใหม่ของ Restricted master problem หรือเป็นเสมือนการเพิ่มขนาดมิติหรือคอลัมน์ของปัญหานั่นเอง จึงเป็นที่มาของชื่อเทคนิคนี้ที่เรียกว่า Column Generation ปัญหา Restricted master problem ที่ถูกปรับเพิ่มใหม่นี้จึงต้องนำไปหาคำตอบอีกครั้งด้วย simplex method แล้ววนรอบซ้ำเช่นนี้เรื่อยไปจนกว่าจะเสร็จสิ้น

สำหรับกรณีปัญหา 1D-SSS-CSP จะใช้ค่า C_j หรือ objective coefficient เท่ากับ 1 สำหรับ j ตั้งแต่ 1 ถึง n หรือวัสดุคงคลังแต่ละเส้นมีต้นทุนการนำมาใช้งานเหมือนกันและเท่ากัน

จะเห็นว่าเทคนิคการหาคำตอบแบบ Column Generation นี้ เป็นการหลีกเหลี่ยงการแก้ปัญหาในขนาดเต็ม แต่เลือกที่จะแก้ปัญหาที่ลดขนาดลงมา และใช้เงื่อนไขของการเป็นคำตอบที่ดีที่สุดมาช่วยในการสร้างข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์ $A_{1s}, A_{2s}, \dots, A_{ms}$ สำหรับตัวแปรใหม่ X_s ซึ่งพิจารณาได้ว่าตัวเงื่อนไขนั้นก็อยู่ในรูปของ optimization problem หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นปัญหาย่อย (subproblem) ซึ่งปัญหาย่อยนี้จะพิจารณาจากรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้ทั้งหมดดังนั้นจึงต้องเป็นไปตามเงื่อนไขที่ไม่เกินกว่าความยาวของวัสดุคงคลัง จะได้แบบจำลองของปัญหาย่อยดังนี้

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์: Minimize $1-\sum_{i=1}^{m}\left(\pi_i^J A_{ij}\right)$

ตัวแปรตัดสินใจ: A_{ij}

เงื่อนไขข้อจำกัด:

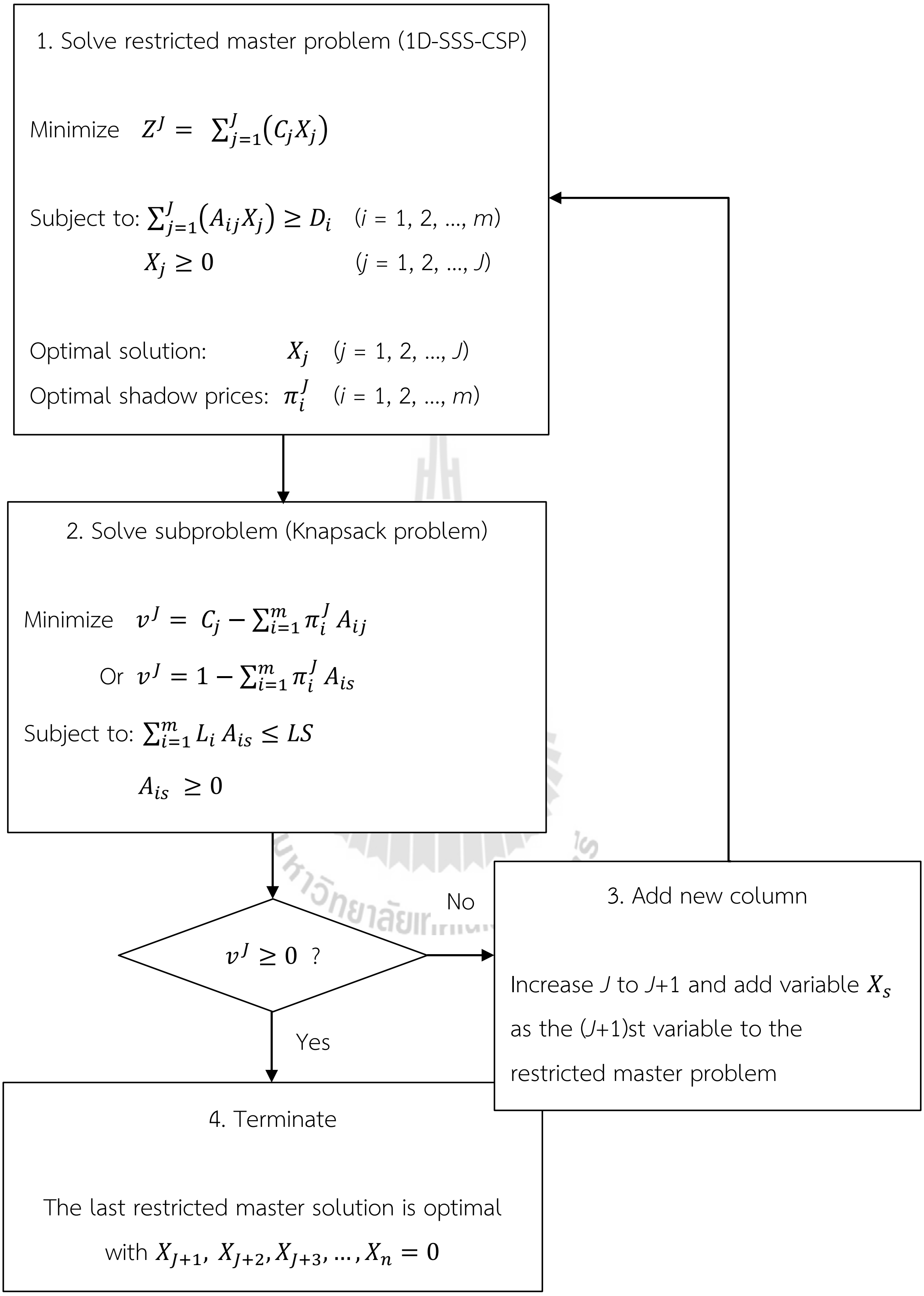
1. ข้อจำกัดด้านความยาว: $\sum_{i=1}^{m}\left(L_i A_{ij}\right) \leq LS$
2. ข้อจำกัดจำนวนเต็มบวก: $A_{ij} \geq 0$ และ $A_{ij} \in \mathbb{N}$

เมื่อพิจารณาลักษณะของปัญหาย่อยจะพบว่าเป็นปัญหาที่จัดอยู่ในกลุ่มของ Knapsack problem ข้อดีของเทคนิค Delayed Pattern Generation คือ

1. สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุด (optimal solution) ได้ก่อนที่ปัญหาที่ลดขนาด (Restricted master problem) จะมีขนาดใหญ่หรือมีจำนวนคอลัมน์ถูกเพิ่มเข้ามามากเกินกว่าจะสามารถหาคำตอบได้ อย่างเช่นในรูปปัญหาดั้งเดิมประสบอยู่

2. การแก้ปัญหาย่อย (subproblem) เพื่อที่จะสร้างคอลัมน์ใหม่ สามารถทำได้ไม่ยาก

สรุปขั้นตอนการหาคำตอบของปัญหา 1D-SSS-CSP ด้วยเทคนิค Delayed Pattern Generation ได้ดังแผนภาพข้างล่างนี้



รูปที่ 2.5 ลำดับขั้นตอน (Flowchart) ของขั้นตอนวิธี Column Generation

เมื่อได้คำตอบที่ดีที่สุดของแบบจำลอง LP relaxation of IP (X_j) แล้ว คำตอบที่ได้อาจไม่ใช่ตัวเลขจำนวนนับ จึงจะต้องทำการปรับปรุงคำตอบให้เป็นตัวเลขจำนวนเต็มบวกต่อไป ซึ่งวิธีการทั่วไปที่นิยมใช้คือการปัดตัวเลขทศนิยมลงเป็นตัวเลขจำนวนเต็ม และเพิ่มบาง X_j เพื่อให้ได้จำนวนท่อนวัสดุครบตามที่ต้องการ จึงเป็นข้อด้อยของวิธีการหาคำตอบแบบ LP Relaxation นี้ที่การปัดตัวเลขให้เป็นจำนวนเต็มอาจทำให้ผลคำตอบที่ได้เป็น suboptimal solution และข้อด้อยอีกประการคือมักจะได้คำตอบที่มีจำนวนรูปแบบการตัดที่ใช้ (n) ใกล้เคียงกับจำนวนความยาวที่แตกต่างกันของวัสดุที่ต้องการ (m) ซึ่งอาจยอมรับได้ในกรณีที่มีคำตอบที่เป็นไปได้จำนวนมากและไม่สามารถหาคำตอบที่ดีกว่านี้ได้ คำตอบที่ได้ที่ประกอบไปด้วยรูปแบบการตัดต่าง ๆ กันจำนวนมากนี้อาจทำให้ยากในการปฏิบัติงานจริงและเป็นเหตุให้ต้นทุนค่าติดตั้งเพิ่มสูงขึ้น (Haessler and Sweeney 1991)

2.3.5 Sequential Heuristic Procedure (SHP)

หลักการของ SHP คือการสร้างรูปแบบการตัดขึ้นทีละหนึ่งแบบอย่างเป็นขั้นตอนจนกระทั่งได้จำนวนของท่อนความยาวตามที่ต้องการครบทั้งหมด ปัจจัยที่ทำให้วิธีนี้ได้ผลคำตอบที่ดีคือการคัดเลือกรูปแบบการตัดที่เหมาะสมในตอนเริ่มแรกของกระบวนการ รูปแบบการตัดที่นำมาใช้ในตอนเริ่มแรกจะต้องเป็นรูปแบบที่มีเศษการตัดน้อย ๆ นำไปใช้ตัดซ้ำได้มาก ๆ และทำให้จำนวนความต้องการที่คงเหลืออยู่สามารถถูกตัดต่อได้อย่างลงตัวด้วยรูปแบบการตัดอันถัด ๆ มา ขั้นตอนต่อไปนี้เป็นการคัดเลือกรูปแบบการตัดที่ดีที่ใช้ได้กับโจทย์ความต้องการทั่วไป (Haessler and Sweeney 1991)

1. คำนวณหา descriptors ของรายการความต้องการที่คงเหลือ ค่า descriptors ที่มักนำมาใช้ได้แก่ จำนวนวัสดุคงคลังที่เหลือ จำนวนท่อนความยาวโดยเฉลี่ยต่อหนึ่งรูปแบบการตัด

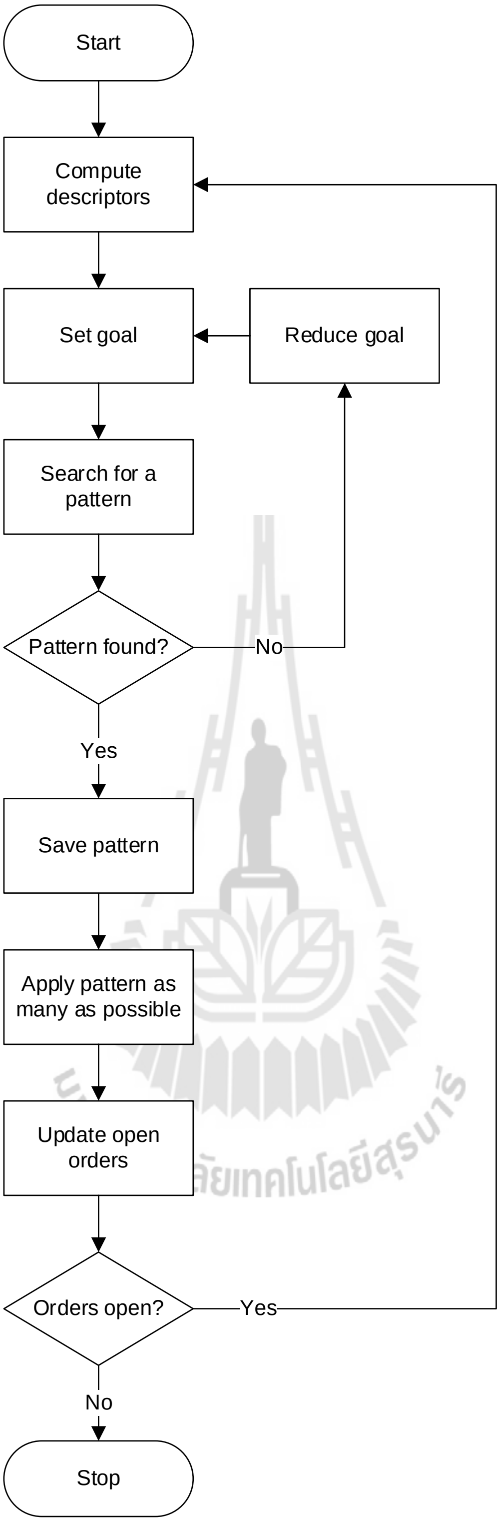
2. ตั้งเป้าหมายสำหรับรูปแบบการตัดอันถัดไป เป้าหมายที่มักนำมาใช้ได้แก่ ปริมาณเศษการตัด จำนวนครั้งของการตัดซ้ำ จำนวนท่อนความยาวที่ถูกตัดออกด้วยรูปแบบ

3. ค้นหารูปแบบการตัดที่สอดคล้องกับเป้าหมายที่ตั้งไว้

4. เมื่อพบรูปแบบการตัดที่ดีแล้วจึงนำมาเพิ่มไว้ในคำตอบ และทำการตัดรูปแบบนี้ซ้ำ ๆ ให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

5. ปรับปรุงรายการความต้องการที่คงเหลือ และทำซ้ำขั้นตอนที่ 1

6. หากไม่พบรูปแบบที่ดี ให้ปรับเปลี่ยนเป้าหมายลง แล้วทำซ้ำขั้นตอนที่ 3



รูปที่ 2.6 ขั้นตอนของ SHP (ปรับปรุงจาก (Vahrenkamp 1996))

เป้าหมายที่เป็นจำนวนครั้งของการตัดซ้ำ (pattern usage) จะเป็นตัวกำหนดขอบเขตบนของจำนวนท่อนความยาวที่ถูกตัดออกด้วยรูปแบบ (number of the ordered length in the pattern) ตัวอย่างเช่น ถ้าให้ท่อนความยาวขนาดหนึ่งมีความต้องการใช้คงเหลือจำนวน 10 ท่อน และกำหนด

เป้าหมาย pattern usage ไว้ที่ 4 ครั้ง แสดงว่า number of the ordered length in the pattern จะไม่เกิน 2 หากเป้าหมายที่กำหนดไว้นี้ไม่สามารถหารูปแบบการตัดได้ จึงต้องปรับลดเป้าหมายลง ในกรณีนี้สมมุติให้ pattern usage ลดลงเหลือ 3 ครั้ง จะทำให้ number of the ordered length in the pattern เปลี่ยนเป็นไม่เกิน 3 ลักษณะการจบของ SHP อาจจะเป็นการเลือกรูปแบบการตัดอันหนึ่งที่ให้เศษน้อยที่จำนวน pattern usage เท่ากับ 1

ข้อดีของ SHP คือสามารถพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ ร่วมกัน แทนที่จะพิจารณาเฉพาะฟังก์ชันวัตถุประสงค์ หรือเศษการตัดทั้งหมด เช่น สามารถพิจารณาปัจจัยจำนวนของรูปแบบที่ใช้ทั้งหมด และควบคุมให้อยู่ในจำนวนต่ำได้ ซึ่งทำให้ได้ลักษณะการ optimization แบบ multi-objective และ SHP ยังมีข้อดีที่ไม่ต้องยุ่งยากกับการปัดคำตอบตัวเลขทศนิยมให้เป็นจำนวนเต็ม ข้อด้อยของ SHP คืออาจให้คำตอบที่มีเศษการตัดมาก ๆ ในช่วงท้าย ๆ ของรอบการค้นหาคำตอบ หรือที่เรียกว่า ‘ending conditions’ (Gradisar et al. 1999) เช่น เหลือท่อนความยาวขนาด 34 cm. ที่ต้องตัดจากวัสดุคงคลังขนาดยาว 100 cm.

Vahrenkamp (1996) ได้ทำการทดสอบ algorithm นี้ได้ผลว่า เมื่อนำ Random search algorithm มาใช้สร้างรูปแบบการตัดต่าง ๆ ที่มีประสิทธิภาพดีได้แล้ว ก็จะนำรูปแบบที่ได้เหล่านี้ไปทำการตัดซ้ำ ๆ เพื่อให้ครบจำนวนท่อนที่ต้องการ โดยได้ใช้ SHP ในการหาคำตอบ และได้ใช้ descriptors ดังนี้

- ค่าประมาณจำนวนวัสดุคงคลังที่ต้องการใช้ทั้งหมด (EN)
- ร้อยละของเศษการตัดที่ยอมรับได้ (TL)
- จำนวนการตัดซ้ำสูงสุด (UN)

โดยค่า descriptors เหล่านี้จะนำไปใช้ในการกำหนดเป้าหมาย (goal) โดยอาจเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายไปตามรอบของการหารูปแบบการตัดอันใหม่ เมื่อเริ่มต้นการหาคำตอบ SHP จะเริ่มด้วยการกำหนดค่า UN ไว้ที่ค่าสูง ๆ เพื่อให้รูปแบบแรกที่นำมาใช้ตัดซ้ำให้มากที่สุด และตอบสนองต่อรายการความต้องการที่มีให้ได้มากที่สุด และทำการลดค่า UN ที่ตั้งเป้าหมายลงเรื่อย ๆ เมื่อดำเนินการกับรูปแบบถัด ๆ ไป ตรงข้ามกับ TL ที่ควรเริ่มจากการกำหนดค่าที่น้อย ๆ และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อดำเนินการกับรูปแบบถัด ๆ ไป

2.3.6 Exhaustive Repetition Heuristic Algorithm

การหาคำตอบของแบบจำลอง 1D-CSP ด้วยวิธี Exhaustive Repetition Heuristic Algorithm (Cherri et al. 2009) มีขั้นตอนดังนี้

Step 1: สร้างรูปแบบการตัดที่ดีสำหรับแต่ละวัสดุคงคลังความยาวมาตรฐานที่ k (k =1, ... , K) (สำหรับปัญหาที่มีวัสดุคงคลังความยาวมาตรฐานหลายความยาว)

Step 2: เลือกรูปแบบที่ดีที่สุดที่ได้จาก Step 1 (เช่น ได้เศษการตัดน้อยที่สุด) รูปแบบการตัดนี้จะเป็นของวัสดุคงคลังที่ k

Step 3: ใช้รูปแบบการตัดที่เลือกใน Step 2 ตัดท่อนความยาวให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ โดยไม่เกินจำนวนที่ต้องการ หรือไม่เกินกว่าจำนวนวัสดุคงคลังที่ k ที่มีอยู่

Step 4: ปรับปรุงรายการจำนวนท่อนความยาวที่ต้องการที่ยังไม่ได้ตัด และจำนวนวัสดุคงคลังและ retails ที่เหลือ

Step 5: ถ้ารายการท่อนความยาวที่ต้องการได้ครบถ้วนแล้วหรือไม่มีวัสดุคงคลังเหลือ ให้จบการดำเนินการ ถ้าไม่แล้วให้ทำซ้ำ Step 1

ประสิทธิภาพของ Exhaustive Repetition Heuristic ขึ้นอยู่กับรูปแบบการตัดที่ดีที่สร้างขึ้นใน Step 1 ซึ่งมี algorithm ที่นิยมสำหรับใช้สร้างรูปแบบการตัดที่ดีได้แก่ First Fit Decreasing (FFD) และ Greedy ซึ่ง algorithm ทั้งสองมีหลักการที่ต่างกันคือ FFD เน้นการตัดท่อนความยาวที่ยาวมากก่อนท่อนที่สั้นเพราะเป็นท่อนความยาวที่ยากต่อการตัดร่วมกับท่อนความยาวขนาดอื่น ๆ แต่ Greedy เน้นการตัดด้วยรูปแบบการตัดที่ดีที่สุดก่อน (เหลือเศษน้อยที่สุด) โดยไม่คำนึงถึงรูปแบบการตัดที่เหลือ การสร้างรูปแบบการตัดด้วย Greedy algorithm เป็นการใช้แบบจำลองปัญหา Knapsack ในการสร้างรูปแบบดังนี้

ตัวแปรตัดสินใจ: $P_j = (A_{1j}, A_{2j}, A_{3j}, \ldots, A_{nj})$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์: $Maximize\ \sum_i a_{ij} L_i$

เงื่อนไขข้อจำกัด:

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 $r_i = B_i$

2.3.7 FFD_L Algorithm with Usable Leftover Consideration

เนื่องจาก CSPUL (Cherri et al. 2009) มีการประเมินคำตอบแบ่งออกเป็นคำตอบที่ดี ที่ยอมรับได้ และที่ไม่ต้องการ ดังนั้นจึงมีการปรับแก้ FFD ที่จะนำมาใช้ด้วยการเพิ่มขั้นตอนการประเมิน

คำตอบเข้าไว้ใน algorithm ได้เป็น FFD_L ซึ่งเป็นการวนลูปในขั้นตอนต่อไปนี้ โดยพิจารณาวัสดุคงคลังทีละความยาวที่ k ที่มีอยู่ (Cherri et al. 2009) มีรายละเอียดดังนี้

Step 1: ใช้ FFD algorithm เพื่อสร้างรูปแบบการตัดสำหรับวัสดุคงคลังที่ k โดยให้สัญลักษณ์ α_k^{FFD} แทนรูปแบบการตัดที่เป็นคำตอบ (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} ออกมาจากรูปแบบ

Step 4: ซึ่งจะทำให้เกิด SPACE ขึ้นขนาดเท่ากับ Leftover ของ α_k^{FFD} + L_i นำส่วน SPACE นี้มาสร้างรูปแบบด้วย แบบจำลอง Knapsack โดยให้สัญลักษณ์ α_k^{Knap} แทนรูปแบบการตัดส่วนที่ได้ที่เป็นคำตอบนี้ (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} ออกมาจากรูปแบบ ซึ่งจะทำให้เกิด SPACE ใหม่อีกเพื่อนำไปสร้างรูปแบบด้วยแบบจำลอง Knapsack อีกเช่นนี้เรื่อยไป จนกว่าจะได้รูปแบบที่ทำให้เกิด leftovers ที่ยอมรับได้

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

2.3.8 Genetic Algorithm

นอกจากการหาจำนวนครั้งของการตัดซ้ำตามรูปแบบการตัดด้วยการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ด้วย LP แล้ว ยังสามารถหาคำตอบจำนวนครั้งของการตัดด้วยแนวทางแบบ Stochastic algorithms ที่ใช้หลักการสุ่มค้นหาคำตอบที่ดีขึ้นเรื่อย ๆ จากกลุ่มของคำตอบที่เป็นไปได้ ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Salem et al. (2007) ได้เสนอแบบจำลองปัญหา CSP ที่มุ่งเน้นที่การตัดเหล็กเส้นในงานก่อสร้าง โดยใช้แนวทางการหาคำตอบแบบ pattern-oriented คือการสร้างรูปแบบการตัดที่ดีก่อนแล้วจึงหาจำนวนครั้งการตัดรูปแบบเหล่านี้ซ้ำ โดยได้ใช้ Genetic Algorithm ในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด

ซึ่งการใช้ GA จะต้องมีการเข้ารหัสของคำตอบของแบบจำลองปัญหา CSP วิธีที่เสนอโดย Salem et al. (2007) คือให้แต่ละโครโมโซมแสดงแทนคำตอบที่เป็นไปได้ 1 คำตอบ ซึ่งประกอบด้วยคู่ของค่าตัวเลข เลขที่รูปแบบการตัดที่เลือกและจำนวนการตัดซ้ำ ดังนั้นโครโมโซมจึงมีลักษณะเป็นสายคู่ของยีน แต่ละยีนประกอบด้วยค่าตัวเลข 2 ตัว ที่เป็นเลขที่รูปแบบการตัดที่เลือกและจำนวนการตัดซ้ำ

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

รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการเข้ารหัสโครโมโซมแสดงแทนคำตอบที่เป็นไปได้ (Salem et al. 2007)

จากรูปโครโมโซมตัวอย่าง หมายถึงคำตอบที่เลือกใช้รูปแบบการตัดเลขที่ 10 ทำการตัดซ้ำจำนวน 2 ครั้ง, รูปแบบการตัดเลขที่ 12 ทำการตัดซ้ำจำนวน 9 ครั้ง, รูปแบบการตัดเลขที่ 26 ทำการตัดซ้ำจำนวน 11 ครั้ง, ... (ตามลำดับ) โครโมโซมตัวอย่างนี้จะเลือกใช้รูปแบบการตัดต่าง ๆ กันจำนวน 6 รูปแบบ ซึ่ง (Salem et al. 2007) ได้เสนอว่าจำนวนรูปแบบการตัดต่างกันที่เหมาะสมในคำตอบควรเท่ากับจำนวนขนาดท่อนความยาวที่ต่างกันที่ต้องการ

การสร้างรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้ (efficient feasible cutting patterns) สำหรับไว้คัดเลือกใช้เป็นคำตอบ ได้ใช้วิธีที่ปรับปรุงจากวิธีที่เสนอโดย (Pierce 1964) ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อก่อนหน้า รูปแบบการตัดที่สร้างได้ถูกนำมากำหนดเลขที่ประจำตัว

ส่วนจำนวนการตัดซ้ำ ได้มีการคำนวณหาจำนวนการตัดซ้ำสูงสุด (the maximum repetition of each generated pattern) ซึ่งถูกกำหนดขอบเขตด้วยจำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i) ของขนาดท่อนความยาว (L_i) ใด ๆ ตัวอย่างเช่น รูปแบบการตัดหนึ่งแสดงในตารางจะมี max. repetition ของรูปแบบการตัดนี้ได้เท่ากับ 9 จำนวนท่อนความยาวที่ตัดเกินความต้องการจะถูกพิจารณาว่าเป็นเศษการตัด

ขนาดท่อนความยาว (L_i)	1	2	3	4	5
จำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i)	20	14	12	17	25
(A_{ij}) ของรูปแบบการตัดที่ j	3	0	2	2	0
จำนวนการตัดซ้ำสูงสุด (max. repetition)	7	0	6	9	0

รูปที่ 2.8 การคำนวณกำหนดจำนวนการตัดซ้ำสูงสุด

นอกจากนี้พวกเขาได้กำหนดใช้ค่าพารามิเตอร์ของ GA ได้แก่ ค่า population size = 2.5 เท่าของความยาวของโครโมโซม ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแบบจำลองกำหนดให้เป็นดังนี้

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) โดยไม่ผ่านปฏิบัติการเปลี่ยนแปลง

โครโมโซม และใช้วิธีการ linear normalization ค่า fitness value ของโครโมโซมที่คำนวณได้ ซึ่งเป็นการใช้ค่าลำดับ (จากการจัดเรียงโครโมโซมที่มีค่า fitness ดีที่สุดไปหาแย่ที่สุด) ในการคัดเลือกโครโมโซมพ่อแม่ แทนการใช้ค่า fitness ที่คำนวณได้โดยตรง ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้เพิ่มโอกาสการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุดที่มีค่าแตกต่างกันน้อย ๆ ได้ จึงช่วยเพิ่มความเร็วในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด (faster convergence)

ปฏิบัติการวิวัฒนาการของโครโมโซมที่เป็นหัวใจของ GA ประกอบด้วย 2 กระบวนการ ได้แก่ ปฏิบัติการ Crossover และ Mutation Operations มีหลักการดังนี้

- Crossover Operations จะใช้การสุ่มเลือกจุดแทรก (insertion point) และส่วนแทรก (segment) ของโครโมโซมพ่อและแม่ ในการสร้างโครโมโซมรุ่นลูกอันใหม่

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

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

2.3.9 Evolutionary Programming (EP)

Liang et al. (2002) ได้สร้างแบบจำลองปัญหา CSP ที่ใช้วิธีการหาคำตอบแบบ Evolutionary Programming (EP) ซึ่งได้ชี้ข้อดีของวิธีการหาคำตอบแบบนี้ ที่เหนือกว่าวิธีแบบ LP คือสามารถพิจารณากับปัญหาที่เป็นลักษณะ non-linear ได้ด้วย เช่น ประเด็นความต่อเนื่องของการตัด หรือการใช้วัสดุคงคลังไม่ให้เกิดเศษเลย เป็นต้น ซึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประเด็นปัญหาเช่นนี้เป็นแบบ non-linear ต่างจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการหาจำนวนเส้นวัสดุคงคลังที่ใช้ทั้งหมด ที่อยู่ในแบบ linear นอกจากนี้ Liang et al. (2002) ยังอ้างว่าปัญหาในโลกความจริงมักมีลักษณะแบบ non-linear และชี้ให้เห็นว่าการใช้วิธีหาคำตอบแบบ heuristic อาจทำให้ได้คำตอบที่ดีไม่สม่ำเสมอได้ เพราะขึ้นอยู่กับว่า heuristic ที่นำมาใช้นั้นจะสอดรับกับโจทย์ข้อนั้นหรือไม่ การหาคำตอบด้วยแนวทางแบบ stochastic จึงดูเหมาะสมกว่าสำหรับ CSP

EP เป็นวิธีการหาคำตอบในกลุ่มเดียวกับ GA แต่มีความเรียบง่ายกว่าและใช้เวลาหาคำตอบน้อยกว่า GA จุดสำคัญของ EP คือจะใช้เฉพาะปฏิบัติการ Mutation Operation เท่านั้น โดยไม่ใช้ปฏิบัติการ Crossover Operation เนื่องจาก ปฏิบัติการ Crossover Operation ของโครโมโซม

order-based GA เป็นการทำให้คำตอบที่ดีแล้วถูกทำลายลงได้ โดยไม่สามารถนำคำตอบที่ดีอยู่แล้วไปพัฒนาต่อในรุ่นถัด ๆ ไปเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น (Hinterding et al. 1994) ดังนั้น EP จึงเป็น algorithm ในการหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพมากกว่า GA

การเข้ารหัสของคำตอบของแบบจำลองปัญหา CSP ด้วย EP สามารถทำได้ 2 ลักษณะคือ group-based และ order-based representations ซึ่ง Liang et al. (2002) แสดงให้เห็นว่าโครโมโซมที่มีการเข้ารหัสแบบ order-based ให้ผลคำตอบที่ดีกว่า group-based representation โดยมีรายละเอียดดังนี้คือ group-based representation จะให้แต่ละยีนแทนกลุ่มของท่อนความยาวที่ตัดได้ด้วยวัสดุคงคลังหนึ่งเส้น เมื่อนำยีนหลากหลายต่างกันมาต่อกันเป็นสายก็จะได้โครโมโซม ซึ่งจะเห็นได้ว่าการสลับลำดับของท่อนความยาวในยีน หรือการสลับลำดับยีนในโครโมโซมจะไม่ส่งผลแตกต่าง

ส่วน order-based representation นั้นจะให้แต่ละโครโมโซมแสดงแทนลำดับของรายการขนาดท่อนความยาวที่ต้องการตัดทั้งหมด (all items) แต่ละค่าของขนาดท่อนความยาวนี้ก็เปรียบได้กับยีนนั่นเอง โดยจะนำลำดับของขนาดท่อนความยาวที่เรียงกันนี้มาทำการคำนวณหาปริมาณเศษการตัดด้วยเสมือนการตัดไปตามลำดับ ดังนั้นการสลับลำดับของท่อนความยาวเหล่านี้จะส่งผลให้เกิดเศษการตัดต่างกันได้ ตัวอย่างเช่น มีรายการความต้องการเป็น ขนาด 3 เมตรจำนวน 2 ท่อน, ขนาด 4 เมตรจำนวน 3 ท่อน, ขนาด 5 เมตรจำนวน 1 ท่อน และขนาด 6 เมตรจำนวน 3 ท่อน โครโมโซมอันหนึ่งเป็นลำดับของขนาดท่อนความยาวเหล่านี้ หากกำหนดให้วัสดุคงคลังมีความยาวเดียวคือ 12 เมตร จะทำให้สามารถคำนวณหาปริมาณเศษตามลำดับท่อนความยาวที่กำหนด แสดงดังในรูปข้างล่างนี้

```
Item list : 5   4   6   3   3   4   6   6
Cut at    :       |           |       |   |
Wastage   :   3         0          2    6
```

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการเข้ารหัสโครโมโซมแบบ order-based representation และการคำนวณหาปริมาณเศษการตัด

ปฏิบัติการ mutation สำหรับ EP ที่ Liang et al. (2002) เสนอเรียกว่า three-point swap ด้วยการนำโครโมโซมตั้งต้นมาทำการ pair-wise swap จำนวนสองครั้งที่เพื่อให้เกิดผลกระทบกับค่ายีน 3 ตัวที่ 3 ตำแหน่ง คือทำการสลับค่าที่หนึ่งกับค่าที่สอง แล้วสลับค่าที่หนึ่ง (ใหม่) กับค่าที่สาม โดยที่ยีนจะถูกเลือกด้วยโอกาสความน่าจะเป็นแบบเสมอ uniformly random และด้วยการใช้ bias ถ่วงน้ำหนักไปที่วัสดุคงคลังเส้นที่เกิดเศษการตัดน้อย

2.4 วัตถุประสงค์ย่อยและข้อจำกัดส่วนเพิ่มของปัญหา

แบบจำลองปัญหา 1D-CSP อยู่ในความสนใจของนักวิจัยและมีการศึกษากันต่อเนื่องมาอย่างยาวนาน ทำให้เกิดเป็นส่วนเพิ่มขยายต่อจากแบบจำลองทั่วไปของปัญหา 1D-CSP เพื่อจัดการกับประเด็นย่อยอื่น ๆ ในรายละเอียด ที่พบในทางปฏิบัตินั้น แม้ว่าวัตถุประสงค์หลักจะยังคงเหมือนกันคือการหาแผนการตัดวัสดุคงคลังให้เกิดเศษการตัดน้อยที่สุด ซึ่งส่วนเพิ่มขยายนี้อาจจะมาในรูปของวัตถุประสงค์ย่อยที่ซ้อนอยู่กับวัตถุประสงค์หลักเดิม (multi-objective function) หรือในรูปของฟังก์ชันข้อจำกัดที่พิเศษเฉพาะกรณี (additional constraints) ตัวอย่างเช่น ประเด็นการมีวัสดุคงคลังหลายขนาด ความต้องการจัดลำดับของรูปแบบการตัด รายการความต้องการที่มีการกำหนดวันส่งมอบ เป็นต้น ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไปในหัวข้อนี้

2.4.1 ความหลากหลายของคำตอบที่ดีที่สุด

1D-CSP นั้นสามารถมีคำตอบที่ดีที่สุดหลากหลายแบบที่ให้ค่าเศษการตัดเท่ากัน (multiple solutions with the same waste) ซึ่งเรียกว่า highly degenerate ทั้งนี้เนื่องมาจากท่อนความยาวในรูปแบบการตัดต่าง ๆ ที่เป็นคำตอบที่ได้สามารถสลับข้ามรูปแบบกันไปมา แล้วกลายเป็นรูปแบบการตัดที่ต่าง ๆ กัน โดยที่ยังได้ปริมาณเศษการตัดรวมที่เท่าเดิมได้ ซึ่งจากลักษณะ degeneracy ของคำตอบของปัญหานี้เองที่ทำให้เกิดประเด็นย่อยในการพิจารณาจัดคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้แล้วต่อไปได้อีก เช่น

1. การใช้รูปแบบการตัดที่น้อยที่สุด (Minimum pattern count problem) เพื่อเป็นการหาคำตอบที่ใช้จำนวนรูปแบบการตัดที่น้อยที่สุด จากในกลุ่มของคำตอบที่ดีที่สุดที่ให้เศษการตัดน้อยที่สุด (ที่อาจมีได้หลากหลายแบบ) ซึ่งเป็นปัญหาที่ยากต่อการหาคำตอบแม้ว่าจะสามารถหาคำตอบที่มีเศษการตัดน้อยที่สุดได้แล้วก็ตาม อย่างไรก็ตามมีสมมติฐานที่ว่า ปัญหาที่มีจำนวนขนาดท่อนความยาวที่ต้องการ n ขนาด จะมีคำตอบที่ให้เศษการตัดที่น้อยที่สุดที่ใช้รูปแบบการตัดไม่เกินกว่า n+1 รูปแบบ นั้นคือตัวแปร n และ m มักจะมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับคำตอบที่ดีที่สุด แต่ขอบเขตบนนั้นไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด

2. การกองงานที่กำลังตัดที่น้อยที่สุด (Minimum stack problem) เป็นปัญหาการจัดเรียงลำดับรูปแบบการตัดต่าง ๆ ที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด เพื่อให้ในระหว่างการตัดเกิดกองวัสดุตามขนาดความยาวที่ต้องการต่าง ๆ จำนวนน้อยที่สุด หรือคือความพยายามตัดท่อนความยาวที่ต้องการทีละขนาดให้ได้ครบจำนวนอย่างต่อเนื่องให้มากสุด โดยมีขนาดท่อนความยาวที่ยังตัดได้ไม่ครบจำนวนน้อย ๆ ในระหว่างการทำงานตัด ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการจัดการพื้นที่ทำงานหรือเพื่อลดต้นทุนของงาน

3. การเปลี่ยนแปลงมีดตัดจำนวนน้อยที่สุด (Minimum number of knife changes problem) เป็นการจัดเรียงลำดับรูปแบบการตัดต่าง ๆ ที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด หรือการปรับเปลี่ยน

รูปแบบใหม่เพื่อจำนวนครั้งของการปรับเลื่อนระยะของใบมีดที่ใช้ในการตัด (ตามรูปแบบ) ให้น้อยครั้งที่สุด ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองของปัญหาย่อยนี้ออกมาได้ในลักษณะเดียวกับปัญหา travelling salesman problem

2.4.2 ความต่อเนื่องของการตัด

ความต่อเนื่อง (Contiguity) ของงานการตัดท่อนความยาวตามรายการที่ต้องการ ในบางกรณีอาจเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณา Liang et al. (2002) ชี้ว่า contiguity เป็นประเด็นที่สำคัญอันหนึ่งที่พบในการปฏิบัติงานจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากตัวงานการตัดมีขนาดปัญหาใหญ่มาก เมื่อขนาดท่อนความยาวขนาดหนึ่ง (L_i) ที่ได้เริ่มทำการตัดไปแล้วแต่ยังไม่ครบจำนวน (partially finished items) อาจจะต้องใช้พื้นที่จำนวนหนึ่งในการกองเก็บ เพื่อรอจนกว่าจะตัดได้ครบจำนวนที่ต้องการ การตัดท่อนความยาว (L_i) ขนาดหนึ่งให้ได้จำนวนครบตามที่ต้องการอย่างต่อเนื่องโดยไม่ขัดจังหวะไปตัดขนาดอื่น ๆ สลับไปมา จึงอาจเป็นการช่วยทำให้ลดต้นทุนหรือสะดวกในการปฏิบัติงานจริง เช่น ลดจำนวนครั้งของการตั้งค่าระยะตัด (knife-setting changes) ทำให้มีความต่อเนื่องของคุณภาพวัสดุ ลดการจัดเก็บชิ้นงานที่ตัดแล้วแต่ยังได้จำนวนไม่ครบตามต้องการ (หากท่อนความยาวขนาดหนึ่งต้องจัดเก็บรวมกัน) (the storage of partly-finished order lengths or unready-for-packaging product stacks) เพื่อจัดการกับประเด็นปัญหานี้ ท่อนความยาวขนาดหนึ่งควรถูกตัดออกมาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งได้จำนวนครบตามต้องการในคราวเดียวหรืออยู่ในรูปแบบการตัดที่ใกล้กันมากที่สุด ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการจัดเรียงลำดับการตัดของรูปแบบการตัดที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุดหาได้แล้ว (contiguous sequencing of patterns) การจัดการกับ contiguity requirements นี้สามารถทำได้โดยการใช้ตัวชี้วัดค่า contiguity และนำไปรวมอยู่ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์หรือฟังก์ชันข้อจำกัด ซึ่งตัวชี้วัดค่า contiguity ได้แก่ ค่าจำนวนสูงสุดที่ยอมให้ของขนาดท่อนความยาวที่ยังตัดได้ไม่ครบจำนวนในชั่วขณะใด ๆ (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 หรือ GAs (Hinterding et al. 1994) เป็นต้น

แบบจำลองปัญหา CSP ที่มีการพิจารณาประเด็นย่อย contiguity จะมีความยากลำบากในการหาคำตอบมากกว่าแบบจำลองที่ไม่พิจารณา contiguity ซึ่งหากทำการหาคำตอบแบบ heuristic approach จะต้องทำการหารูปแบบการตัดวัสดุคงคลัง (cutting patterns) ก่อนแล้วจึงทำการเรียงลำดับรูปแบบเหล่านี้ให้มี contiguity มากที่สุด หรืออาจใช้วิธีสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบสองฟังก์ชันร่วมกัน (Multi-objective function) เช่นงานวิจัยของ Liang et al. (2002) ได้สร้างฟังก์ชัน

สำหรับวัดปริมาณค่าการเกิดเศษการตัด และปริมาณค่าดัชนีที่ชี้วัดความไม่ต่อเนื่อง (open orders) เพื่อที่จะทำการหาค่าผลรวมที่น้อยที่สุด มีรายละเอียดดังนี้

Minimize $\sum_j f(T_j, O_j)$

โดยที่ $O_j = \sum_i o_i$

$$o_i = \begin{cases} 0; if \ \sum_j X_{ij} = 0 \text{ , or } \sum_j X_{ij} = D_i \\ 1; otherwise \end{cases}$$

$f(T_j, O_j)$ 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 (D_i) จะมีสถานะเป็นปิดหรือมีค่าเท่ากับ 0

โดยรูปของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้เสนอโดย Hinterding et al. (1994) และถูกนำไปใช้ต่อโดย Liang et al. (2002) ด้วยคือ

$$\text{Minimize } \frac{1}{n+10}\left(\sum_j^n \left(\sqrt{\frac{T_j}{LS_j}}\right) + \frac{10}{n}\sum_j^n \left(\frac{O_j}{m}\right)^2\right)$$

โดยที่ m คือ จำนวนขนาดที่แตกต่างกันของท่อนความยาวที่ต้องการ

n คือ จำนวนเส้นของวัสดุคงคลังที่ใช้ในคำตอบ (ในกรณีนี้พิจารณาในลักษณะ item-oriented)

T_j คือ เศษการตัดวัสดุคงคลังเส้นที่ j

LS_j คือ ความยาวของวัสดุคงคลังเส้นที่ j (ในกรณีนี้ให้วัสดุคงคลังอาจมีความยาวต่างกัน)

O_j คือจำนวนขนาดที่แตกต่างกันของท่อนความยาวที่ยังตัดได้ไม่ครบจำนวน (number of open items)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์หรือ Fitness Function นี้ประกอบด้วยสองพจน์ พจน์แรกจะเป็นการชี้วัดปริมาณเศษการตัด ส่วนพจน์ที่สองจะเป็นการบังคับให้เกิดการตัดแบบต่อเนื่อง (contiguity) อย่างไรก็ตาม การบังคับให้เกิดการตัดที่ต่อเนื่องมากเกินไปอาจส่งผลให้เกิดเศษมากขึ้นและเกินกว่าที่ยอมรับได้

Yanasse and Pinto Lamosa (2007) ได้เสนอแบบจำลองที่มีแนวคิดคล้ายกับประเด็น contiguity คือการพิจารณาลำดับของการตัด (cutting sequence) รูปแบบการตัด เนื่องจากการ

เริ่มต้นตัดรูปแบบการตัดอันใหม่ อาจเป็นการเริ่มต้นตัดท่อนความยาวอันใหม่ซึ่งเรียกว่าเป็นสถานะ opened stack ในทางปฏิบัติคือท่อนความยาวที่มีขนาดเดียวกันควรจะมีการกองเก็บไว้กองเดียวกัน ท่อนความยาวแต่ละขนาดที่ยังตัดได้จำนวนไม่ครบตามที่ต้องการอาจทำให้ต้องมีการกองเก็บไว้ในพื้นที่บริเวณใกล้กับเครื่องจักรตัด รอการตัดให้ครบจำนวนแล้วจึงนำออกไปส่งมอบต่อไป ซึ่งหากจำนวน opened stack มีมากเกินไปในขณะหนึ่งอาจทำให้พื้นที่การทำงานไม่เพียงพอหรือประสิทธิภาพการทำงานลดลง ลำดับของการตัด (cutting pattern sequence) ที่ดีจะสามารถช่วยลดจำนวน opened stack ในขณะใดลงได้ แบบจำลองปัญหานี้เหมือนเป็นการผสมรวมกันของปัญหา cutting stock และปัญหา pattern sequencing

หากพิจารณาแบบจำลองปัญหา Minimization of Opened Stack Problem จะได้ว่า

ตัวแปรตัดสินใจ: X_{jk}

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์: $Minimize\ C$

เงื่อนไขข้อจำกัด:

1. ข้อจำกัดจำนวนสูงสุดของ opened stack: $\sum_{k}^{n-1} P_k \leq m - C$

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

โดยที่:

X_{jk} คือ ตัวแปรแบบ binary แสดงสถานะของรูปแบบการตัดที่ j ที่อยู่ในลำดับการตัดที่ k โดยที่จะมีค่าเป็น 1 เมื่อ รูปแบบการตัดที่ j ถูกจัดอยู่ในลำดับการตัดที่ k นอกเหนือจากนี้จะมีค่าเป็น 0 ซึ่งจะทำให้สำหรับ j ใด ๆ $\sum_k X_{jk} = 1$ และสำหรับ k ใด ๆ $\sum_j X_{jk} = 1$

m คือ จำนวนท่อนความยาวที่ต่างกันทั้งหมด

n คือ จำนวนรูปแบบการตัดที่ใช้ทั้งหมด

C คือ จำนวน opened stack สูงสุดที่เคยเกิดขึ้นที่ขณะใด

P_k คือ จำนวน opened stack <u>อันใหม่</u> (ยังไม่เคยเริ่มตัดมาก่อน) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัดรูปแบบที่ k ซึ่ง $P_k \geq W_{k+1} - W_k$ และ $P_k \geq 0$

W_k คือ จำนวน stack (จำนวนท่อนความยาวที่ต่างกัน) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัดรูปแบบที่ k โดยที่ $W_k \leq C$

a_{ij} คือ เวกเตอร์ขนาด m ของค่า binary ที่แสดงว่ามีท่อนความยาวอะไรบ้างในรูปแบบการตัดที่ j โดยที่ $X_{jk} \cdot a_{ij} \leq W_k$

2.4.3 จำนวนวัสดุคงคลังที่เกิดเศษการตัด

นอกจากวัตถุประสงค์หลักของปัญหา 1D-CSP ที่ต้องการหาแผนการตัดวัสดุคงคลังเพื่อให้เกิด "ปริมาณ"เศษการตัดน้อยที่สุดแล้ว วัตถุประสงค์ย่อยอันหนึ่งที่ช่วยเสริมหรือทำให้เศษการตัดที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่เป็นท่อนยาวขึ้น ซึ่งอาจนำไปใช้ประโยชน์อื่นต่อไปได้ คือการกำหนดให้มีจำนวนเส้นวัสดุคงคลังที่เกิดเศษขึ้นที่น้อยที่สุด หรือคือพยายามให้วัสดุคงคลังถูกตัดอย่างพอดีเส้นโดยไม่เหลือเศษด้วยรูปแบบการตัดที่ดีให้มีจำนวนเส้นมากที่สุด ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการสร้างฟังก์ชันที่วัดจำนวนเส้นวัสดุคงคลังที่ถูกตัดแล้วเกิดเศษขึ้น ($T_j \neq 0$) มีหลักการดังนี้

แบบจำลองใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สองฟังก์ชันร่วมกัน (Multi-objective function) คือ การเกิดเศษการตัดที่น้อยที่สุด และการมีจำนวนเส้นวัสดุคงคลังที่เกิดเศษขึ้นที่น้อยที่สุด 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

โดยรูปแบบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์นี้ หรือ Fitness functions ที่เสนอโดย Hinterding et al. (1994) และถูกนำไปใช้ต่อโดย (Liang et al. 2002) ประกอบด้วยสองพจน์ พจน์แรกจะเป็นการวัดปริมาณเศษการตัด ส่วนพจน์ที่สองจะเป็นการบังคับให้เกิดการตัดวัสดุคงคลังแบบพอดีทั้งเส้น รายละเอียดมีดังนี้

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

โดยที่ n คือ จำนวนเส้นของวัสดุคงคลังที่ใช้ในคำตอบ (ในกรณีนี้พิจารณาในลักษณะ item-oriented)

T_j คือ เศษการตัดวัสดุคงคลังเส้นที่ j

LS_j คือ ความยาวของวัสดุคงคลังเส้นที่ j (ในกรณีนี้ให้วัสดุคงคลังอาจมีความยาวต่างกัน)

V_j คือ สถานะแสดงว่าวัสดุคงคลังเส้นที่ j มีเศษการตัด

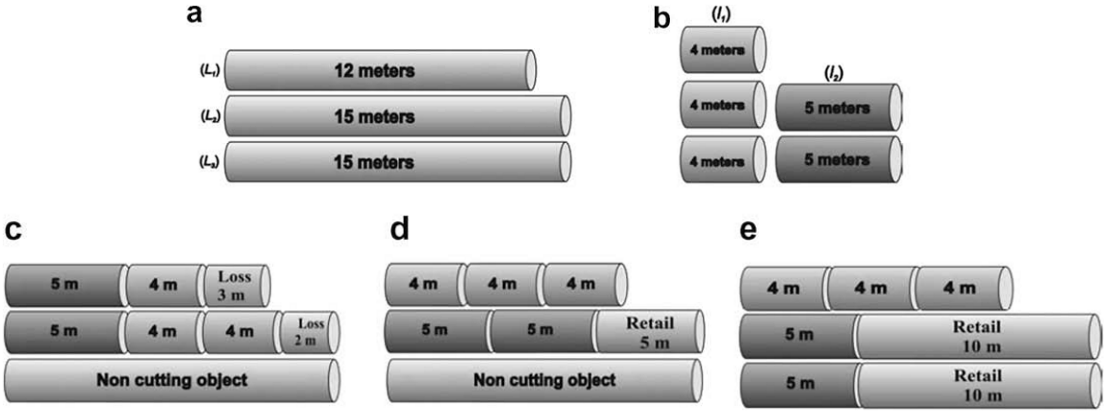
2.4.4 เศษการตัดที่นำไปใช้ได้

ในขั้นตอนการตัดวัสดุคงคลังให้ได้ขนาดท่อนความยาวตามต้องการนั้น จะทำให้เกิดท่อนส่วนที่เหลือ (leftover) ขึ้นจากการตัดตามรูปแบบที่ไม่พอดีเส้น ซึ่งหลีกเหลี่ยงได้ยาก ท่อนส่วนที่เหลือ (leftover) นี้หมายถึง ส่วนของวัสดุคงคลัง (stock length) ที่เหลือจากการตัดท่อนความยาวที่ต้องการ (items) ที่อาจจะมีความยาวมากน้อยแตกต่างกันไป ซึ่งบางท่อนอาจมีความยาวมากเพียงพอและสามารถนำกลับมาใช้ตัดเป็นท่อนความยาวขนาดอื่น ๆ ได้อีกภายหลังสำหรับรายการความต้องการของงานในอนาคต หรือเรียกว่า usable leftover (Cherri et al. 2009) (Cherri et al. 2014) แต่หากสั้นเกินไปจนไม่สามารถนำกลับไปใช้ต่อได้ ท่อนส่วนเหลือนี้ก็จะกลายเป็นเศษที่แท้จริงหรือ scraps ดังนั้นวัตถุประสงค์ของแบบจำลองปัญหา 1D-CSP ที่ต้องการให้เกิดเศษการตัดน้อยที่สุด จึงคล้ายคลึงกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการให้เกิด leftover น้อยที่สุด อย่างไรก็ตามหากพิจารณาประเด็นย่อยดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดเป็นปัญหาใหม่ที่ต้องการให้เกิดการนำ leftover กลับมาใช้ตัดอีกให้มากที่สุด

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

จากขอบเขตของปัญหานี้ทำให้ต้องมีการกำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาว่า leftovers อันใดที่จัดเป็น scraps และอันใดที่จัดเป็น retails เพื่อนำไปเก็บไว้ใช้ต่อไป เกณฑ์การกำหนดนี้ขึ้นอยู่กับการตัดสินใจ โดยอาจใช้ความยาวของท่อนความยาวที่ต้องการที่ยาวที่สุด (the longest length of the demanded items), ความยาวเฉลี่ยของท่อนความยาวที่ต้องการทั้งหมด, หรือความยาวที่สั้นที่สุดของท่อนความยาวที่ต้องการ ทั้งนี้การกำหนดด้วยขนาดที่ยาวที่สุดหรือสั้นที่สุดควรพิจารณาให้ไม่ห่างกับขนาดท่อนความยาวโดยปกติ (typical) เกินไปนัก

แบบจำลองปัญหา 1D-CSP โดยทั่วไปที่ไม่ได้พิจารณาประเด็น leftovers จะมี objective functions เป็นการหาปริมาณเศษการตัดรวมที่น้อยที่สุด หรือการหาจำนวนวัสดุคงคลังที่ต้องใช้น้อยที่สุด หรือการหาต้นทุนของงานที่น้อยที่สุด เป็นต้น แต่ในแบบจำลอง CSPUL (Cherri et al. 2009) ได้กำหนดให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นแบบ multi-objective functions ซึ่งรวมกันระหว่าง การหาปริมาณเศษรวม scraps ที่น้อยที่สุด และการหาจำนวนท่อน retails ที่น้อยที่สุด ซึ่งอาจทำให้คำตอบที่มี leftovers เท่ากันมีประสิทธิผลต่างกันได้ ดังตัวอย่างในรูปข้างล่าง กำหนดให้ retail คือ leftover ที่ยาวมากกว่า 4 เมตร มีวัสดุคงคลังความยาวมาตรฐานอยู่ในรูปย่อย a มีขนาดท่อนความยาวที่ต้องการในรูปย่อย b จะได้ว่าคำตอบที่เป็นไปได้มีอยู่ 3 แบบดังแสดงในรูปย่อย c, d, และ e



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างกรณีปัญหา CSPUL ที่ให้ผลเป็น retails และ scraps ต่างกัน (Cherri et al. 2009)

จากตัวอย่างนี้หากใช้ objective functions ของ CSPUL ในการประเมินคำตอบแบบต่าง ๆ จะได้ว่า 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 multi-objective functions ของ CSPUL ที่เกิดจากการรวมกันของ 2 ฟังก์ชัน ทำให้แนวทางการประเมินคำตอบแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะคือ

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

2.4.5 วัสดุคงคลังหลายขนาดและมีจำนวนจำกัด

ปัญหาทั่วไปของ 1D-CSP มักจะกำหนดให้วัสดุคงคลังมีขนาดเดียวเท่ากันและมักเป็นประเภทการมอบหมายงานที่กำหนดให้วัสดุคงคลังมีจำนวนไม่จำกัดเพื่อให้ได้ตามจำนวนขนาดท่อนเล็กที่ต้องการทั้งหมด หรือ Input minimization ตามหลักการนิยามของ Wäscher et al. (2007) หรือ “V” ตามหลักการนิยามของ Dyckhoff (1990) อย่างไรก็ดี อาจมีปัญหาในทางปฏิบัติจริงบางกรณีที่ไม่

เป็นไปตามลักษณะทั่วไปนี้ ซึ่งทำให้การสร้างแบบจำลองของปัญหาและการหาคำตอบที่ดีที่สุดเป็นไปด้วยความยากลำบาก

งานวิจัยหนึ่งในนั้นคือ Gradisar et al. (1997) ได้พิจารณาปัญหาการตัดในกรณีที่ไม่ปกติ คือ กำหนดให้มีวัสดุคงคลังหลายขนาดหรือ“D” ตามหลักการนิยามของ Dyckhoff (1990) และมีจำนวนจำกัดไม่เพียงพอ ทำให้เป็นประเภทการมอบหมายงานแบบ Output maximization ตามหลักการนิยามของ Wäscher et al. (2007) หรือ “B” ตามหลักการนิยามของ Dyckhoff (1990) อย่างไรก็ตาม พวกเขาได้กำหนดให้ในส่วนของลักษณะคละของท่อนความยาวที่ต้องการเป็นแบบที่มีขนาดท่อนที่ต้องการต่าง ๆ กันจำนวนมากและมีความต้องการแต่ละขนาดเป็นจำนวนมาก หรือ Strongly heterogeneous assortment ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับปัญหาทั่วไป

วัสดุคงคลังที่มีหลากหลายขนาดอาจจะมาจากท่อนส่วนที่เหลือจากการตัดครั้งก่อนที่ยังยาวพอที่จะนำกลับมาใช้ได้อีก (usable leftovers หรือ retails) จากกรณีที่กล่าวในหัวข้อก่อนหน้า หรือวัสดุคงคลังนั้นอาจมีจำหน่ายหลายขนาดความยาวมาตรฐาน (ไม่ใช่กรณีของเหล็กเส้นที่เป็นวัสดุเชิงเส้นหลักที่ใช้ในงานก่อสร้าง ที่มีขนาดความยาวมาตรฐานเพียง 10 และ 12 เมตร และวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นอื่น ๆ มักมีจำหน่ายที่ขนาดความยาวมาตรฐานเดียว) ซึ่งลักษณะปัญหาที่ไม่ปกตินี้ทำให้วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมเป็นแนวทางแบบ item-oriented approach ซึ่งจะพิจารณาวัสดุคงคลังแต่ละเส้นที่นำมาตัดและทำการตัดแบบเฉพาะเส้นต่อเส้น ไม่สามารถหารูปแบบการตัดเพื่อทำการตัดซ้ำ ๆ ได้ตามแนวทางแบบ pattern-oriented approach และเนื่องจากแนวทาง item-oriented approach จะไม่สามารถสร้างแบบจำลองของปัญหาแบบ Linear Programming ได้ จึงทำให้วิธีการหาคำตอบกับปัญหากรณีพิเศษนี้ต้องอาศัยวิธีแบบ Heuristic rules ดังนั้น (Gradisar et al. 1997; Gradisar et al. 1999) จึงได้เสนอวิธีการหาคำตอบแบบ item-oriented ที่ใช้หลักการ Sequential Heuristic Procedure (SHP)

แบบจำลองที่เสนอมีรายละเอียดแบ่งเป็น 2 กรณีดังนี้ กำหนดให้วัสดุคงคลังมีขนาดความยาวต่าง ๆ กันทั้งหมดและเป็นเลขแบบจำนวนเต็ม

กรณีที่ 1 สำหรับประเภทการมอบหมายงาน Input Minimization มีจำนวนวัสดุคงคลังอยู่อย่างเพียงพอสำหรับรายการความต้องการทั้งหมด

ตัวแปรตัดสินใจ: a_{ij}

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์: $Minimize\ \sum_j (t_j)$

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

เงื่อนไขข้อจำกัด:

- ข้อจำกัดด้านความต้องการ: $\left(\sum_j (a_{ij})\right)_i \geq D_i$ สำหรับ i ตั้งแต่ 1 ถึง m

- ข้อจำกัดด้านความยาวของวัสดุคงคลัง: $\sum_i (L_i \cdot a_{ij}) + \delta_j \leq LS_j$

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

- ข้อจำกัดด้านจำนวนท่อนความยาวที่ต่างกันที่ตัดจากวัสดุคงคลังหนึ่งเส้น: $\sum_i (w_{ij}) \leq W$ สำหรับ j ตั้งแต่ 1 ถึง n

- ข้อจำกัดจำนวนบวก

โดยที่

$Z_j = \begin{cases} 0; if\ a_{ij} = 0 \\ 1; otherwise \end{cases}$ คือ ตัวแปรแสดงสถานะว่าวัสดุคงคลังที่ j ได้ถูกนำมาใช้ตัด

$w_j = \begin{cases} 0; if\ a_{ij} = 0 \\ 1; otherwise \end{cases}$ คือ ตัวแปรแสดงว่าท่อนความยาว L_i ถูกตัดจากวัสดุคงคลังที่ j

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

กรณีที่ 2 สำหรับประเภทการมอบหมายงาน Output Maximization มีจำนวนวัสดุคงคลังจำนวนจำกัดไม่เพียงพอสำหรับการตัดตามจำนวนขนาดท่อนเล็กที่ต้องการได้ทั้งหมด แบ่งเป็นกรณีย่อยได้อีก ตามการกระจายของท่อนความยาวที่ต้องการที่ไม่ได้ถูกตัด

กรณีที่ 2.1 เมื่อการกระจายของท่อนความยาวที่ต้องการที่ไม่ได้ถูกตัดไม่สำคัญ สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเป็นการหาผลรวมความยาวของท่อนความยาวที่ไม่ได้ตัดที่น้อยที่สุด

ตัวแปรตัดสินใจ: a_{ij}

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์: $Minimize\ \left(\sum_i \left[B_i - \sum_j (a_{ij})\right]\right) \cdot L_i$

เงื่อนไขข้อจำกัด: เหมือนกับของกรณีที่ 1 ยกเว้นข้อจำกัดที่ 1

กรณีที่ 2.2 เมื่อการกระจายของท่อนความยาวที่ต้องการที่ไม่ได้ถูกตัดมีความสำคัญ มีเป้าหมายให้การกระจายของท่อนความยาวที่ต้องการที่ไม่ได้ถูกตัดเป็นแบบสม่ำเสมอ สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเป็น

ตัวแปรตัดสินใจ: a_{ij}

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์: $Minimize\ \left(\sum_i \left[B_i - \sum_j (a_{ij})\right]\right)$

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

เงื่อนไขข้อจำกัด: 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

ทำให้ได้ข้อสรุปสำหรับการเลือกท่อนความยาวและวัสดุคงคลังในขั้นตอนที่ 1 และ 2 ดังนี้

1.ขั้นตอนการเลือกท่อนความยาว พิจารณาจากนโยบายในการเลือกจะได้ว่า ให้เลือกท่อนความยาวที่ยังตัดได้ไม่ครบจำนวนที่มีจำนวนท่อนความต้องการที่ยังไม่ได้ตัดเหลืออยู่มากที่สุด (the greatest number of uncut pieces) การเลือกเช่นนี้จะทำให้ความหลากหลายของขนาดท่อนความยาวที่เหลืออยู่ ยังคงอยู่จนกระทั่งจบการหาคำตอบ จะทำการเลือกท่อนความยาวตามลำดับนี้ส่วนหนึ่ง และส่วนที่เหลือจะเลือกท่อนความยาวที่ยังตัดได้ไม่ครบจำนวนตามลำดับความยาวที่ยาวที่สุด

2. ขั้นตอนการเลือกวัสดุคงคลัง พิจารณาจากนโยบายในการเลือกจะได้ว่า ให้ทำการคำนวณหาเศษตัดของวัสดุคงคลังเส้นที่เหลืออยู่แต่ละเส้น หากนำมาตัดท่อนความยาวที่เลือกไว้ในข้อที่ 1 แล้วทำการเลือกวัสดุคงคลังเส้นที่ทำให้เกิดเศษตัดน้อยที่สุด หากมีวัสดุคงคลังที่เกิดเศษน้อยที่สุดเท่ากันหลาย

เส้น ให้เลือกเส้นที่สั้นที่สุด ซึ่งจะทำให้วัสดุคงคลังเส้นที่ยาวกว่าถูกนำไปใช้ในช่วงท้ายของการหาคำตอบและเป็นไปตามนโยบายที่กำหนด

2.4.6 การกำหนดขนาดของงานการตัด

กระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมหลายประเภทมักประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่หนึ่งการรับมอบคำสั่งความต้องการจากลูกค้าที่เป็นปริมาณของสินค้า (products) ประเภทต่าง ๆ รวมทั้งกำหนดส่งสินค้า ขั้นตอนที่สองคือการแปลงให้คำสั่งความต้องการนี้เป็นความต้องการของชิ้นส่วนประกอบย่อย ๆ (pieces) ขั้นตอนที่สามคือการกำหนดแผนการตัดวัสดุคงคลังให้เป็นชิ้นส่วนประกอบย่อย ๆ เพื่อให้ได้ปริมาณตามความต้องการและทันตามกำหนดส่งในแต่ละรอบของการผลิต อีกทั้งยังต้องกำหนดให้เกิดต้นทุนค่าจัดเก็บ ต้นทุนค่าเริ่มต้นการผลิต และต้นทุนของเศษการตัดให้น้อยที่สุด ดังนั้นในการวางแผนกระบวนการผลิตจริงที่พิจารณาแบบต่อเนื่อง (Production planning) จึงเป็นปัญหาการตัดวัสดุที่ผสมกับปัญหาการจัดขนาดของงาน (lot sizing) ซึ่ง Gramani and França (2006) ได้เสนอแบบจำลองปัญหาที่ผสมกันไว้ดังนี้

ตัวแปรตัดสินใจ: X_{jt}

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

เงื่อนไขข้อจำกัด:

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

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

โดยที่:

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

D_{it}คือ จำนวนท่อนความยาวที่ต้องการที่ i ในช่วงการผลิตที่ t

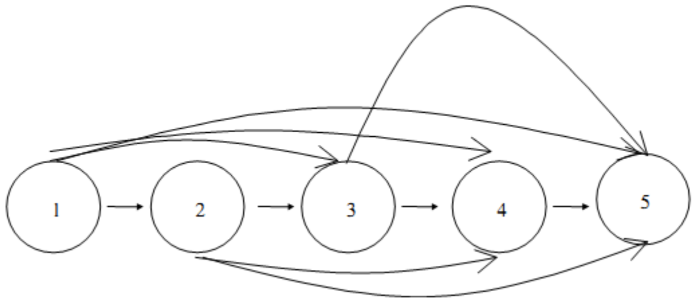
I_{it} คือ จำนวนท่อนความยาวที่ i ที่เหลือจากความต้องการและทำการจัดเก็บ ในช่วงการผลิตที่ t โดยที่ $I_{it}\geq 0$ และ $I_{it}\in\mathbb{N}$

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

แบบจำลองปัญหาข้างบนที่ Gramani and França (2006) ได้เสนอนี้ เป็นปัญหาการตัดวัสดุคงคลังในช่วงการผลิตต่าง ๆ หากนำแบบจำลองปัญหาย่อยมาร้อยเรียงกันตามแผนการผลิต (หลาย ๆ ช่วงการผลิต) ที่ต่อเนื่องกัน จะได้เป็นปัญหาการวางแผนการผลิตโดยรวม ซึ่งสามารถสร้างให้อยู่ในรูปแบบจำลองปัญหาแบบ Network Shortest Path โดยให้แต่ละ arc (k-l) ของ network แสดงแทนแบบจำลองปัญหาการตัดวัสดุคงคลังในระหว่างช่วงการผลิตย่อย ตั้งแต่ช่วงที่ k ไปจนถึงช่วงที่ l ตัวอย่างเช่น หากคำตอบของแบบจำลองปัญหา Network Shortest Path เลือก arc หนึ่งเป็น (1-4) หมายถึงว่าการผลิตให้ครอบคลุมช่วงการผลิตที่ 1, 2, และ 3 จะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด



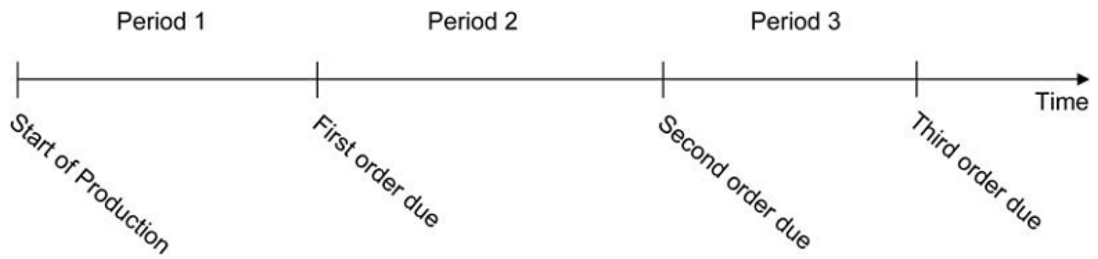
รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงเส้น arc ที่เป็นไปได้ทั้งหมดของปัญหา Network Shortest Path

2.4.7 งานการตัดที่มีกำหนดวันส่งมอบ

คำตอบของแบบจำลองปัญหา CSP โดยทั่วไปจะประกอบด้วย รูปแบบการตัด (cutting patterns) ที่เลือกใช้ และจำนวนครั้งของการตัดรูปแบบเหล่านั้น (run lengths) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าข้อมูลทั้งสองชุดนี้ประกอบกันได้เป็นแผนการตัดวัสดุคงคลัง (cutting plan) อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าคำตอบทั่วไปนี้ไม่ได้รวมประเด็นของกำหนดเวลาไว้ด้วย ซึ่งทำให้ไม่สามารถจัดตารางเวลาของการตัด (cutting scheduling) ได้หากรายการความต้องการมีการกำหนดวันส่งมอบ (due dates) ด้วย ในบางกรณีการตัดให้ทันตามกำหนดวันส่งมอบอาจมีความสำคัญกว่าการตัดให้เกิดเศษน้อย ซึ่งการจัดการตารางเวลาของการตัดอาจทำให้เกิด open stacks จำนวนมาก ก่อให้เกิดปัญหา inventory หรือเกิดปัญหา bottlenecks ที่ขั้นตอน downstream process

Gramani and França (2010) ได้เสนอแบบจำลองปัญหา CSP ที่พิจารณากำหนดวันส่งมอบของรายการความต้องการ ซึ่งเป็นประเด็นที่จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการวางแผนการตัดวัสดุเหล็กเส้นในงานก่อสร้าง แบบจำลองปัญหา CSP ที่พิจารณากำหนดวันส่งมอบมีลักษณะที่คล้ายกับการพิจารณาลำดับการตัดรูปแบบการตัด (cutting sequence) พวกเขาได้กำหนดให้รายการความต้องการทั้งหมดในรอบการวางแผนหนึ่ง (planning horizon) เป็นค่าที่รู้แน่ชัด และมีวัสดุคงคลังขนาดมาตรฐานจำนวนไม่จำกัด สมมติฐานคือให้รอบการวางแผนหนึ่งถูกแบ่งออกเป็นช่วงการผลิตต่าง ๆ (periods) ที่กำหนดด้วยวันส่งมอบ (due dates) ดังรูปข้างล่าง และสมมติให้รายการความต้องการที่ *i* มีกำหนดส่ง

มอบเรียงตามลำดับช่วงการผลิตที่ *k* ซึ่งสมมติฐานนี้ทำให้แบบจำลองที่ได้ไม่สมจริงนักแต่เพื่อความง่ายของแบบจำลอง (Reinertsen and Vossen 2010)



รูปที่ 2.12 ช่วงการผลิตต่าง ๆ ที่กำหนดด้วยวันส่งมอบในรอบการวางแผนหนึ่ง

วัตถุประสงค์ของแบบจำลองปัญหาคือการหารูปแบบการตัดที่ต้องใช้และจำนวนครั้งการตัดรูปแบบเหล่านั้น สำหรับในแต่ละช่วงการผลิต เพื่อให้ได้ตามรายการความต้องการและทันต่อกำหนดส่งมอบ หรือให้เกิดค่า tardiness cost (ค่าปรับจากการล่าช้ากว่ากำหนด) น้อยที่สุด รายละเอียดของแบบจำลองที่เสนอมีดังนี้

ตัวแปรตัดสินใจ: X_{jk}

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์: $Minimize\ \sum_k \sum_j (X_{jk}) + \sum_i (T \cdot Y_i)$

เงื่อนไขข้อจำกัด:

1. ข้อจำกัดด้านขนาดของวัสดุคงคลัง: $\sum_i a_{ij} L_i \ \leq LS$ สำหรับรูปแบบการตัดที่ *j* ใด ๆ

2. ข้อจำกัดด้านจำนวนที่ต้องการ: $\sum_{k=1}^{i} \sum_j a_{ij} \cdot X_{jk} \leq D_i$ สำหรับ *i* ตั้งแต่ 1 ถึง *m* จะเห็นได้ว่า k และ i มีความสัมพันธ์กัน เนื่องจากสมมติให้ *i* เรียงเป็นลำดับตาม *k*

โดยที่:

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

C_i คือ จำนวนเส้นวัสดุคงคลังที่ตัดได้ตามกำหนดส่งมอบ ของท่อนความต้องการที่ *i*

Y_i คือ จำนวนเส้นวัสดุคงคลังที่ตัดล่าช้ากว่ากำหนดส่งมอบและถูกปรับ ของท่อนความต้องการที่ *i*

T คือ อัตราค่าปรับของการล่าช้ากว่ากำหนดส่งมอบ ต่อจำนวนเส้นวัสดุคงคลัง

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

อย่างไรก็ตาม พิจารณาได้ว่า C_i เป็นค่าที่ถูกจำกัดด้วยความสามารถของกำลังผลิต (machine capacity)

แบบจำลองแรกข้างต้นใช้สมมติฐานที่ว่าแต่ละขนาดท่อนความยาว *i* จะมีวันที่ส่งมอบเพียงวันเดียวทั้งกลุ่มและอยู่ในกลุ่มการผลิตเดียวกันด้วย ซึ่งข้อสมมติฐานนี้อาจไม่จริงในทางปฏิบัติที่มักจะมีหลายขนาดท่อนความยาวที่มีกำหนดส่งมอบวันเดียวกัน เช่น เป็นการส่งให้ลูกค้ารายเดียวกันจึงส่งมอบพร้อมกัน หรือในทางกลับกันขนาดท่อนความยาวหนึ่งอาจมีการส่งมอบหลายครั้งหลายวัน โดยเฉพาะวัสดุก่อสร้างเช่น เหล็กเส้น ที่ต้องการให้ส่งวัสดุตามขนาดความยาวที่ต้องการด้วยจำนวนที่ต้องการในวันที่จะนำไปใช้เท่านั้น ดังนั้นจึงเหมือนกับเป็นการแบ่งแยกจำนวนที่ต้องการสำหรับขนาดท่อนความยาวหนึ่งออกเป็นกำหนดส่งมอบหลาย ๆ ครั้ง

แบบจำลองที่ปรับปรุงใหม่จากสมมติฐานให้รายการความต้องการที่ *i* มีกำหนดส่งมอบเรียงตามลำดับช่วงการผลิตที่ *k* เปลี่ยนเป็นการแบ่งช่วงการผลิตที่ k ที่มีรายการความต้องการต่าง ๆ กันผสมกัน รายละเอียดของแบบจำลองที่ปรับปรุงจะเป็นดังนี้

ตัวแปรตัดสินใจ: X_{jk}

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์: $Minimize\ \sum_k \sum_j X_{jk} + \sum_k T \cdot Y_k$

เงื่อนไขข้อจำกัด:

1. ข้อจำกัดด้านขนาดของวัสดุคงคลัง: $\sum_i a_{ij} L_i \ \leq LS$ สำหรับรูปแบบที่ *j* ใด ๆ

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

โดยที่:

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

C_k คือ จำนวนเส้นวัสดุคงคลังที่ตัดได้ตามกำหนดส่งมอบ ก่อนสิ้นสุดช่วงการผลิตที่ *k*

Y_k คือ จำนวนเส้นวัสดุคงคลังที่ตัดล่าช้ากว่ากำหนดส่งมอบซึ่งถูกค่าปรับตามอัตราอนสิ้นสุดช่วงการผลิตที่ *k*

T คือ อัตราค่าปรับของการล่าช้ากว่ากำหนดส่งมอบ ต่อจำนวนเส้นวัสดุคงคลัง

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

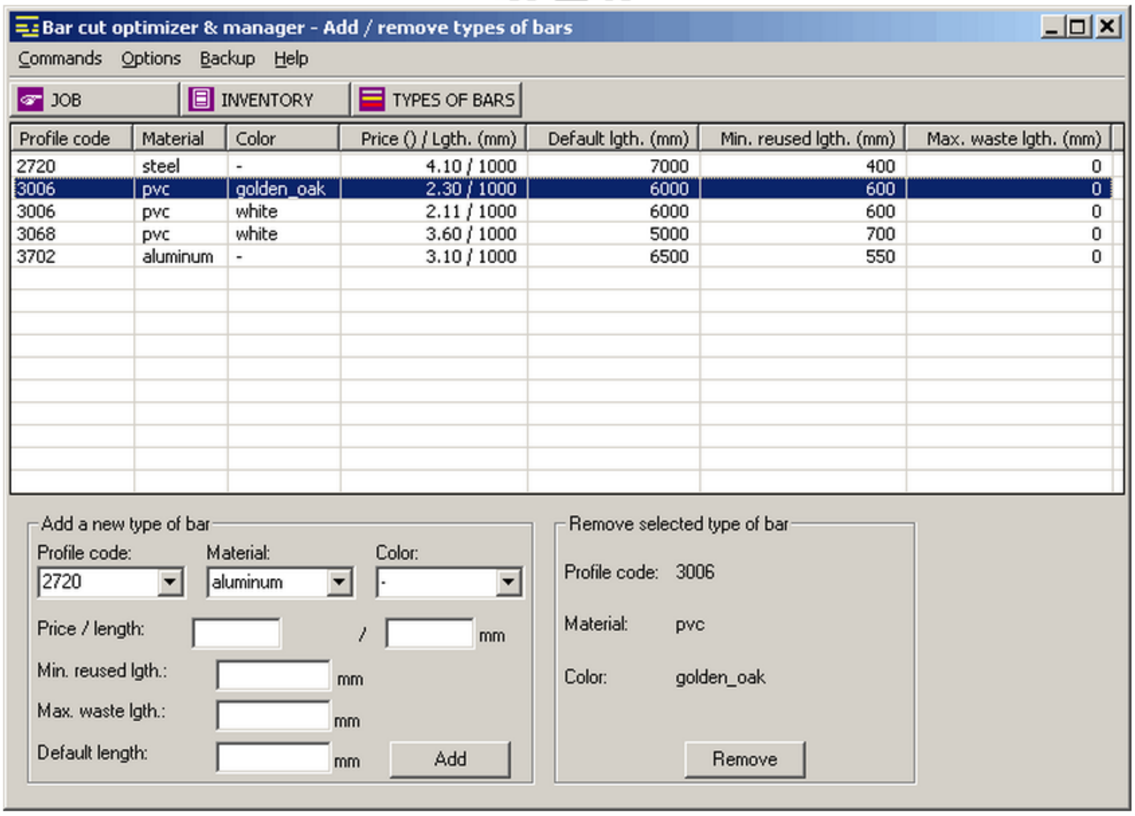
นอกจากนี้แบบจำลองปัญหานี้ยังอาจขยายไปครอบคลุมในกรณีที่มีวัสดุคงคลังหลายขนาดมาตรฐานได้อีกด้วย

2.5 การจัดการกับปัญหาการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นที่เป็นอยู่

2.5.1 โปรแกรมสำเร็จรูปที่มีอยู่

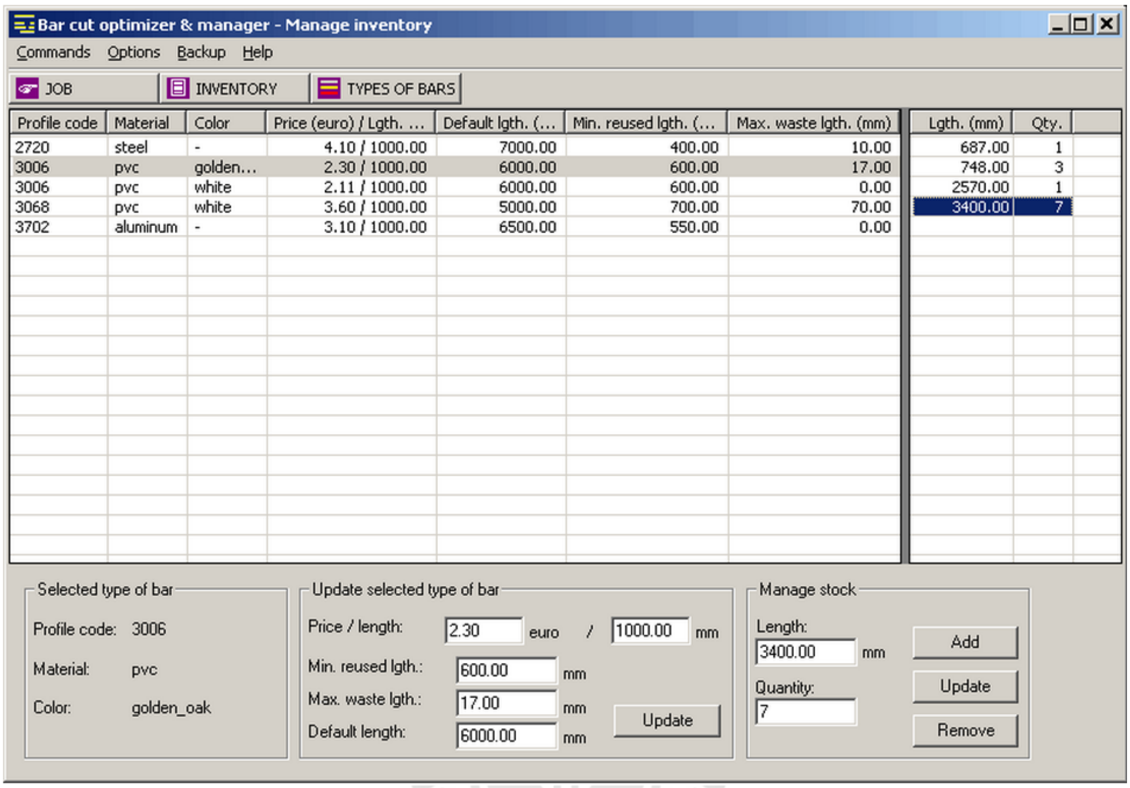
นอกจากวิธีการแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่มีอยู่ในงานวิจัยแล้ว ยังมีโปรแกรมสำเร็จรูปจำนวนหนึ่งที่ใช้ในการสร้างแผนการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้น ได้แก่ Bar Cut Optimizer and Manager ® (Binrace SRL, 2008) ซึ่งพัฒนาโดยบริษัทจากประเทศโรมาเนีย โปรแกรมนี้มีความสามารถในการสร้างแผนการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นเพื่อให้เหลือเศษน้อยที่สุด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

1. Managing types of materials สามารถจัดการกับวัสดุเชิงเส้นได้หลากหลายประเภท ซึ่งรวมถึงการบริหารฐานข้อมูลของวัสดุประเภทต่าง ๆ เหล่านี้ ผู้ใช้สามารถสร้างรหัสเฉพาะสำหรับวัสดุเชิงเส้นแต่ละประเภท ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันได้ เช่น ประเภทวัสดุ ราคาต่อหน่วย ขนาดความยาวมาตรฐาน เกณฑ์ขนาดความยาวที่เป็นเศษ ดูรูปข้างล่างประกอบ



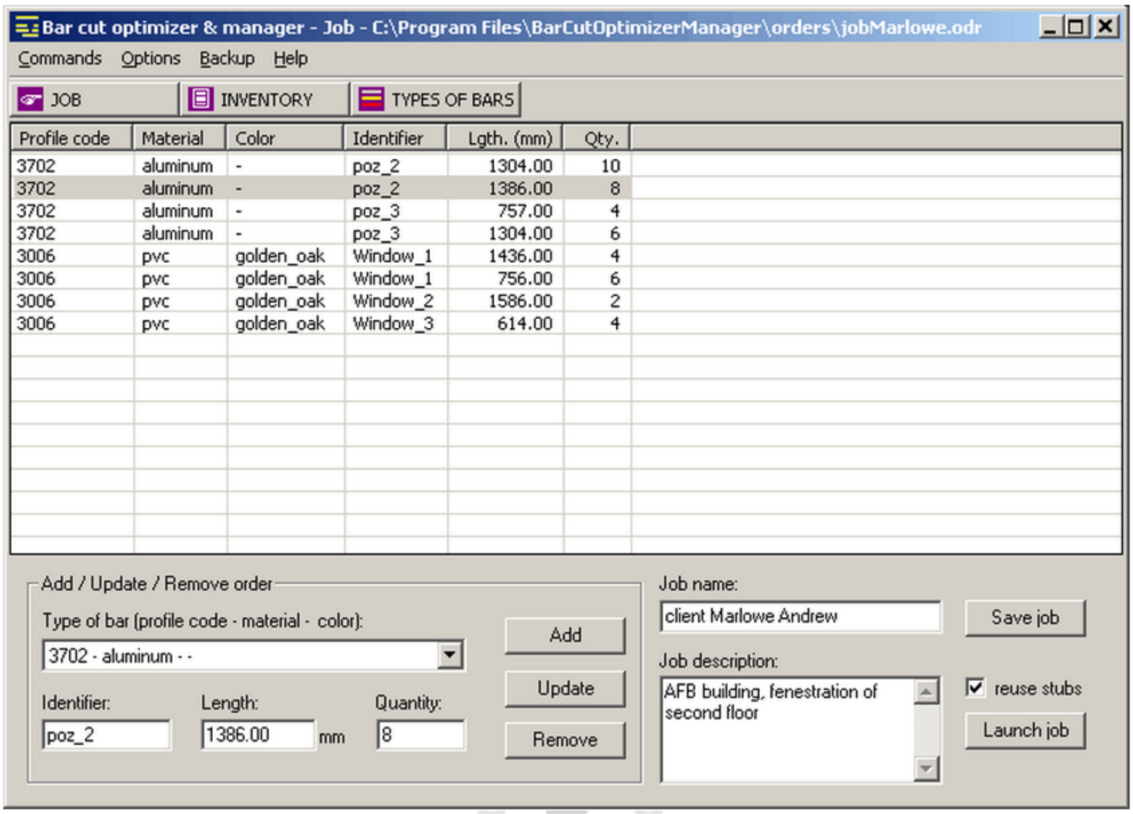
รูปที่ 2.13 การจัดการกับประเภทวัสดุของโปรแกรม Bar Cut Optimizer and Manager

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



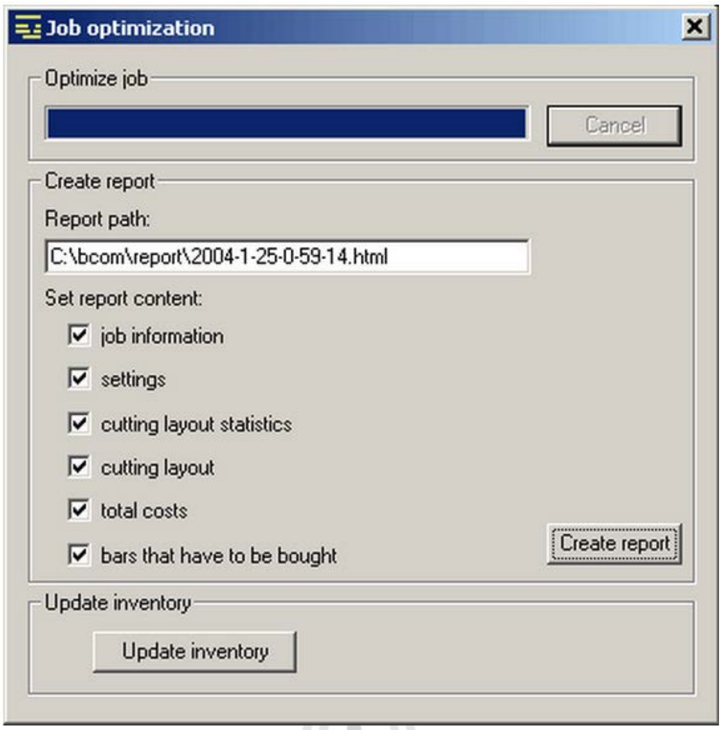
รูปที่ 2.14 การบริหารจำนวนวัสดุคงคลัง (ทั้งขนาดมาตรฐาน และ leftovers) ของโปรแกรม Bar Cut Optimizer and Manager

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



รูปที่ 2.15 การป้อนข้อมูลรายการความต้องการสำหรับงานใหม่ของโปรแกรม Bar Cut Optimizer and Manager

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



รูปที่ 2.16 การรายงานผลลัพธ์และการปรับปรุงจำนวนวัสดุคงคลังของโปรแกรม Bar Cut Optimizer and Manager

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

2.5.2 การสำรวจงานการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นในประเทศไทย

เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ดีกับสภาพปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นในงานก่อสร้างของประเทศไทย และวิธีการจัดลำดับการตัดวัสดุคงคลังแบบที่เป็นอยู่จริง การวิจัยนี้ได้เลือกทำการศึกษาวัสดุก่อสร้างคงคลังเชิงเส้นเฉพาะกรณีของเหล็กเส้น (Reinforcement steel bars) ทั้งนี้เนื่องจากงานก่อสร้างในประเทศไทยนิยมใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นหลัก เหล็กเส้นจึงเป็นวัสดุหลักของโครงการที่มีปริมาณการใช้เป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่มีราคาต่อหน่วยสูง ซึ่งงานวิจัยของสุวิชชา สมบุญ และ วชรภูมิ เบญจโอฬาร (2555) และ (2558) ได้ทำการสำรวจ Algorithms ที่ใช้ในการจัดลำดับการตัดเหล็กเส้น โดยใช้วิธีการสัมภาษณ์และแบบสอบถามกลุ่มตัวอย่างที่เป็นผู้รับผิดชอบดูแลงานการตัดเหล็กเส้นซึ่งก็คือวิศวกรสนาม และกลุ่มผู้ปฏิบัติงานซึ่งก็คือคนงานตำแหน่งช่างเหล็ก และนำผลการศึกษาที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างทั้งสองกลุ่มมาทำการเปรียบเทียบกัน จำนวนตัวอย่างผู้ให้ข้อมูลรวม

ทั้งสิ้น 60 รายแบ่งเป็น กลุ่มวิศวกรจำนวน 30 คน และกลุ่มช่างเหล็กจำนวน 30 คน จากโครงการก่อสร้างจำนวน 30 โครงการ ของ 28 บริษัทต่าง ๆ กัน โดยเป็นงานก่อสร้างประเภทอาคารสูง และโรงงาน วิธีการที่ใช้ในการคัดเลือกตัวอย่างคือ การสุ่มโดยกำหนดเลือก (Purposive sampling) ซึ่งโครงการที่ถูกเลือกจะต้องเข้าเกณฑ์พื้นฐานได้แก่ เป็นงานก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก อยู่ในระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างงานโครงสร้าง ทั้งนี้เพื่อความสะดวกต่อการเก็บข้อมูล

โดยตัวแบบสอบถามประกอบด้วยส่วนสำคัญคือโจทย์ปัญหาที่เตรียมขึ้นเพื่อให้ผู้ถูกสัมภาษณ์หาคำตอบพร้อมทั้งอธิบายถึงหลักการวิธีการจัดรูปแบบการตัดของตนเอง ผู้ถูกสัมภาษณ์ทุกคนจะได้โจทย์ปัญหาเหมือนกัน ซึ่งนำไปเปรียบเทียบผลคำตอบและวิธีการจัดรูปแบบของแต่ละคนได้ นอกจากนี้ในตัวแบบสอบถามยังเก็บข้อมูลรายละเอียดทั่วไปของผู้ตอบ เพื่อนำมาศึกษาปัจจัยส่วนบุคคลที่ทำให้ใช้วิธีการที่ต่าง ๆ กันในการจัดรูปแบบการตัดเหล็กเส้น โจทย์ปัญหาที่ใช้ในแบบสอบถามเป็นรายการตัดเหล็กเส้น (bar cut list) ที่แสดงถึงความต้องการใช้เหล็กเส้นที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและขนาดท่อนความยาวต่าง ๆ กัน และเป็นจำนวนท่อนต่าง ๆ กัน โจทย์ปัญหานี้เตรียมขึ้นจากแบบก่อสร้างแสดงรายละเอียดการเสริมเหล็ก (shop drawings) ของชิ้นส่วนอาคาร ได้แก่ ฐานราก พื้น เสา และคาน ข้อมูลโจทย์ประกอบด้วยรูปร่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเส้น ความยาวท่อน และจำนวนท่อนที่ต้องการใช้ ดังแสดงข้อมูลโจทย์ในรูปข้างล่างนี้

i	*Li*	*Di*	*i*	*Li*	*Di*	*i*	*Li*	*Di*	*i*	*Li*	*Di*	*i*	*Li*	*Di*
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*	*Di*	*i*	*Li*	*Di*	*i*	*Li*	*Di*	*i*	*Li*	*Di*	*i*	*Li*	*Di*
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 ข้อมูลโจทย์ปัญหาการจัดลำดับการตัดเหล็กเส้น

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจจากแบบสอบถามและสัมภาษณ์ พบว่าสามารถแบ่งกลุ่ม algorithms ที่วิศวกรและช่างเหล็กใช้ในการตัดได้ทั้งหมด 7 กลุ่ม โดย algorithms ที่ต่างกันเหล่านี้ประกอบขึ้นจากขั้นตอนย่อยจำนวน 9 ขั้นตอนต่าง ๆ กัน โดยกลุ่มที่มีผลการสูญเสียเหล็กเส้นน้อยที่สุดเป็นอันดับที่ 1 และมีค่าเฉลี่ยของการสูญเสียเหล็กเส้นเท่ากับ 5.35 เมตร ซึ่งผู้ตอบ

แบบสอบถามของกลุ่มนี้ที่มีทั้งวิศกรและช่างเหล็กส่วนใหญ่มีอายุอยู่ในช่วงมากกว่า 35 ปี และมีประสบการณ์การทำงาน มากกว่า 15 ปี โดยมี algorithms จัดลำดับการตัดเหล็กเส้นดังนี้

1. เลือกเหล็กชิ้นงานที่เป็นเลขจำนวนเต็ม (ความยาวของเหล็กเส้นที่ไม่มีจุดทศนิยม) มาจับคู่กับ เหล็กที่มีความยาวสั้นที่สุด (เพราะว่าการเลือกตัดความยาวจำนวนเต็มก่อนจะทำให้คิดเศษเหล็กง่ายและสะดวกในการจับคู่ที่ทำให้เหลือเศษเหล็กน้อย)

2. เลือกเหล็กชิ้นงานที่มีความยาวมากที่สุด มาจับคู่กับ เหล็กที่มีความยาวรองลงมา ถ้าเหลือเหล็กพอกับความยาวจะจับคู่กับ เหล็กที่มีความยาวสั้นที่สุด (เพราะว่าการจัดเรียงลำดับแบบนี้จะส่งผลให้เศษเหล็กส่วนที่เหลือสามารถนำกลับไปใช้ได้ดีกว่าการเลือกจับคู่ตัดเหล็กที่มีความยาวมากที่สุด จับคู่เหล็กที่มีความยาวมากที่สุด)

3. วนซ้ำจนครบจำนวนความยาวที่ต้องการ

Algorithm ของกลุ่มนี้มีการวางแผนที่ซับซ้อนในการจับคู่รายการท่อนความยาวต่าง ๆ และคำนึงถึงการจัดลำดับการตัดเหล็กเส้นเพื่อให้เกิดเศษน้อย

ในส่วนที่ 2 ของแบบสอบถามซึ่งประกอบด้วยข้อคำถามที่เกี่ยวข้องกับวิธีการที่ใช้ในการจัดลำดับการตัดเหล็กเส้น จำนวน 9 ข้อ ซึ่งการตอบข้อคำถามเหล่านี้จะเป็นลักษณะการสัมภาษณ์ ดังนี้

1. ในการตัดเหล็กเส้นของวิศวกรและช่างเหล็กเพื่อให้ได้ตามแบบ Bar Cut มีการจัดลำดับการตัดหรือไม่

2. ในการตัดเหล็กเส้นของวิศวกรและช่างเหล็กจะเลือกตัดเหล็กอย่างไรก่อน

3. ในการจัดลำดับการตัดเลือกตัดเหล็กเส้นขนาดใหญ่ก่อนหรือขนาดเล็กก่อน

4. ในการตัดเหล็กตามแบบ Bar Cut จะตัดตามจำนวนของแต่ละแบบนั้นให้เสร็จก่อนหรือคละจำนวนของแต่ละแบบต่อการตัดในเหล็กเส้นเต็มหนึ่งเส้น

5. ค้นพบการเริ่มต้นการตัดเหล็กเส้นรูปแบบนี้ตั้งแต่เมื่อใด

6. ในโครงการก่อสร้างมีการสูญเสียเศษเหล็กเกิดขึ้นทางบริษัทมีวิธีการจัดการอย่างไรกับเศษที่เหลือจากการตัดเหล็กเส้น

7. ผู้บริหารโครงการมีการให้ความสำคัญเกี่ยวกับการสูญเสียเศษเหล็กเส้นหรือไม่ และดำเนินการต่อการสูญเสียเหล็กเส้นอย่างไร

8. ข้อจำกัดของวิศวกรและช่างเหล็กที่มีผลกระทบต่อการทำงาน

9. ข้อเสนอแนะและอื่น ๆ

ผลที่ได้พบว่าการตัดเหล็กเส้นของผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีการคิดไตร่ตรองเพื่อจัดลำดับก่อนการตัดทุกครั้ง บริษัทมีวิธีการจัดการกับเศษเหล็กที่เหลืออยู่ 3 วิธี คือ 1.นำเศษเหล็กที่เหลือในโครงการไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ ภายในโครงการ เช่น นำไปใช้เป็นเหล็กต่อหัวเสา เหล็กกันแตก ใช้เชื่อมติดแบบเหล็กและใช้เหล็กเป็นค้ำยันไม้แบบ 2.นำเศษเหล็กที่เหลือในโครงการก่อสร้างนี้ไปใช้กับโครงการอื่น ๆ ต่อไปได้ และ 3.นำเศษเหล็กที่เหลือไปขาย ผู้บริหารโครงการส่วนใหญ่ให้ความสำคัญเกี่ยวกับประเด็นการสูญเสียเศษเหล็กเส้นเป็นอย่างมากเนื่องจากส่งผลกระทบต่อต้นทุนของโครงการโดยตรง ในขณะที่ก็มีบางบริษัทที่ไม่คำนึงถึงความสูญเสียเศษเหล็กแต่ให้ความสำคัญกับระยะเวลาในการทำงานมากกว่า โดยเลือกใช้วิธีที่ตัดได้อย่างสะดวกและรวดเร็วแม้จะเกิดเศษเหล็กเส้นสูงขึ้น ในส่วนของข้อจำกัดของวิศวกรและช่างเหล็กพบว่ามี 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ประสบการณ์ทำงาน ซึ่งหากมีไม่เพียงพอก็จะทำให้ทำงานล่าช้าไม่ทันกับกำหนดเวลา และมีการตัดผิดพลาดทำให้เกิดเป็นเศษเหล็กได้อีกปัจจัยคือจำนวนผู้ปฏิบัติงาน และปัจจัยระยะเวลาทำงานที่ซึ่งหากมีการเร่งงานก็จะทำให้งานการตัดเหล็กเส้นเกิดความผิดพลาดได้มาก

จากการศึกษาสำรวจนี้ยังพบว่าโครงการก่อสร้างทั้งหมดมอบหมายให้ช่างเหล็กเป็นผู้ทำการจัดรูปแบบการตัด โดยวิศวกรเป็นผู้เตรียมรายการความต้องการเหล็กเส้นโดยไม่ได้มีการพิจารณาจัดเรียงลำดับให้เหมาะสมกับการตัด (ที่ยังไม่จัดเรียงลำดับเพื่อให้เกิดเศษการตัดน้อยที่สุด) ดังนั้นช่างเหล็กของโครงการจึงเป็นผู้ทำหน้าที่พิจารณาจัดรูปแบบการตัดเพื่อให้เกิดเศษมากน้อยตามวิธีการที่ตนเองสร้างขึ้น ซึ่งผลการศึกษาชี้ว่ามีปริมาณเศษการตัดรวมกันทุกขนาดความยาวสูงถึงประมาณ 18% ของปริมาณเหล็กที่ต้องการใช้ หรือหากพิจารณาปริมาณเศษการตัดเฉพาะแบบ scraps (ขนาดความยาวน้อยกว่า 4 เมตร) จะได้ปริมาณเศษการตัดที่เกิดขึ้นโดยเฉลี่ยเป็น 8.15% ของปริมาณเหล็กที่ต้องการใช้ โดยเศษการตัดที่ได้จากกลุ่มวิศวกรและกลุ่มช่างเหล็กมีปริมาณไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละช่วงความยาวของเศษ ยกเว้นช่วงเศษขนาดสั้นมากที่ยาวน้อยกว่า 0.25 เมตร พบว่ากลุ่มวิศวกรทำให้เกิดเศษในช่วงนี้มากกว่ากลุ่มช่างเหล็กอย่างมีนัยสำคัญ และยังสังเกตแนวโน้มได้ว่ากลุ่มวิศวกรจะสร้างเศษการตัดที่ประกอบด้วยขนาดท่อนที่สั้นมากและยาวมากผสมกัน โดยมีค่า standard deviation ของขนาดเศษมากกว่าของช่างเหล็กเล็กน้อย แต่เศษการตัดของกลุ่มช่างเหล็กจะประกอบด้วยขนาดท่อนช่วงกลาง ๆ ซึ่งลักษณะเศษการตัดที่ประกอบด้วยขนาดท่อนที่ต่างกันมาก ๆ หรือมี standard deviation มากจะเป็นที่ปรารถนามากกว่า เนื่องจากหมายถึงเศษที่สามารถนำกลับไปใช้ได้อีกมีปริมาณมากกว่านั่นเอง

นอกจากนี้ผลการศึกษายังชี้ให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างอายุและประสบการณ์การทำงานของช่างเหล็ก กับปริมาณเศษการตัดที่เกิดขึ้น โดยช่างเหล็กที่มีอายุและประสบการณ์ทำงานมากกว่าจะมีอัตราการสูญเสียต่ำกว่า และนโยบายผู้บริหารก็มีส่วนช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานคือช่างเหล็กเกิดความคิดคำนึงถึงความสูญเสียเหล็กเส้น และกระตุ้นให้ช่างเหล็กคิดหาวิธีการจัดรูปแบบการตัดที่ช่วยลดเศษการตัดลงได้มากขึ้น

จากการพิจารณาวิธีการจัดรูปแบบการตัดของช่างเหล็ก พบว่าวิธีการจัดรูปแบบที่ซับซ้อนกว่าและมีการพิจารณาจับคู่จะช่วยให้เกิดอัตราการสูญเสียที่ต่ำกว่า วิธีการจัดรูปแบบที่ไม่มีการพิจารณาจับคู่หรือใช้การจัดรูปแบบเพื่อให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วในการตัดเพียงอย่างเดียว วิธีการจัดรูปแบบการตัดที่สำรวจพบได้ยังมีความหลากหลายไม่มีมาตรฐานหรือการสอนให้กันอย่างชัดเจน แต่กลับเป็นวิธีการที่ช่างเหล็กแต่ละบุคคลสร้างขึ้นเองตามประสบการณ์ทำงาน อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าวิธีการจัดรูปแบบที่ใช้ยังคงเป็นแบบอย่างง่าย ไม่มีความซับซ้อนเพียงพอที่จะทำให้ลดการสูญเสียจากการตัดได้อย่างมีนัยสำคัญ

2.6 สรุปการทบทวนวรรณกรรม

วัสดุก่อสร้างเชิงเส้นที่ใช้อยู่โครงการก่อสร้างทั่วไปมีอยู่หลากหลายประเภท ได้แก่ สายไฟ ไม้แปรรูป ท่อต่าง ๆ เหล็กรูปพรรณ และเหล็กเส้น โดยเฉพาะเหล็กเส้นจัดเป็นวัสดุก่อสร้างหลักอย่างหนึ่งสำหรับโครงสร้างแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นที่นิยมในประเทศไทย และเหล็กเส้นยังมีปริมาณการใช้สูงและราคาต้นทุนต่อหน่วยสูงเมื่อเทียบกับวัสดุเชิงเส้นอื่น ๆ ของโครงการ วัสดุก่อสร้างเชิงเส้นโดยทั่วไปมักมีจำหน่ายในขนาดหน้าตัดมาตรฐานต่าง ๆ และความยาวเส้นมาตรฐานเพียงไม่กี่ความยาวหรือเป็นลักษณะของวัสดุคงคลัง (stock materials) ที่มีความยาวเท่ากัน หรือ single size stock (หากพิจารณาว่า leftovers ที่มีอยู่มีปริมาณไม่มากและไม่ส่งผลอย่างมีนัยยะ) ในทางตรงข้ามรายการความต้องการกลับมีความหลากหลายของขนาดท่อนความยาวและจำนวนที่ใช้ ขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของชิ้นงานตามแบบก่อสร้างนั้น และยังขึ้นอยู่กับขนาดและประเภทของโครงการก่อสร้างอีกด้วย งานการตัดจึงเป็นภาระที่หลีกเลี่ยงไม่ได้สำหรับการใช้งานวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นเหล่านี้ ทั้งนี้มักมีการแบ่งงานการตัดออกเป็นงวดงานหรือ lot ต่าง ๆ กันตามกำหนดที่ต้องการนำไปใช้หรือให้สอดคล้องกับความก้าวหน้าของโครงการ แต่อย่างไรก็ตามอาจสรุปได้ว่ารายการความต้องการมักมีลักษณะคละแบบ strongly heterogeneous assortment ที่มีจำนวนความยาวของท่อนที่ต้องการหลากหลายขนาดในแต่ละ lot ของงานการตัด แต่เนื่องจากในงานวิจัยที่ผ่านมากลับไม่พบว่ามีการกำหนดดีกรีความคละของรายการความต้องการนี้ด้วยเกณฑ์ที่แน่ชัด ทั้งที่ดีกรีความคละนี้จะส่งผลโดยตรงต่อความยากในการหาคำตอบที่ดีที่สุด และน่าจะส่งผลต่อปริมาณเศษการตัดด้วย ปัญหาการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นจึงเป็นปัญหาที่สำคัญและท้าทายสำหรับการบริหารงานโครงการก่อสร้าง

ปัญหาการตัดวัสดุเชิงเส้นนี้ เป็นแบบจำลองปัญหาที่มีลักษณะเชิงซ้อน เสมือนกับมีปัญหา 2 ปัญหาซ้อนกันอยู่ คือปัญหาการหารูปแบบการตัดที่ดี (formation of efficient cutting patterns) และปัญหาการหาจำนวนครั้งของการตัดรูปแบบที่ดีเหล่านั้น (optimization of cutting times) ซึ่งคำตอบจากปัญหาแรกจะเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการหาคำตอบของปัญหาที่สอง จึงส่งผลต่อกันโดยตรง ความซับซ้อนของปัญหาทำให้มักมีคำตอบที่เป็นไปได้ (feasible solutions) และคำตอบที่ดีที่สุด (optimal solutions) อยู่เป็นจำนวนมาก (ที่ให้ค่าที่ดีเสมอกัน) นอกจากนี้ความซับซ้อนของ

ปัญหายังทำให้ต้องเกี่ยวข้องกับค่า parameters เป็นจำนวนมาก จึงทำให้มีแนวทางในการสร้างแบบจำลองปัญหาที่หลากหลาย และการพิจารณาเงื่อนไขต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ เช่น contiguity, lot size, due date, availability of stock, leftovers ทำให้เกิดเป็นประเภทปัญหาย่อยต่าง ๆ ซึ่งแต่ละประเภทย่อยก็เหมาะสมกับวิธีการแก้ปัญหาที่ต่าง ๆ กัน แนวทางวิธีการแก้ปัญหาอาจแบ่งออกได้กว้าง ๆ เป็นสองแนวทาง item-based approach และ pattern-based approach (Dyckhoff 1990) แนวทางทั้งสองนี้เหมาะสมกับลักษณะโจทย์ปัญหาที่ต่างกัน

Item-based approach เป็นการพิจารณาตัดวัสดุคงคลังที่ละเส้น ด้วยท่อนความยาวที่คัดเลือกมาไว้ตามลำดับ โดยไม่มีการสร้างรูปแบบการตัดไว้ก่อน ซึ่งจะเหมาะโจทย์ปัญหาขนาดเล็กหรือกลุ่มประเภท Single Bin Size Bin Packing Problem (SBSBPP) ที่มี D_i เป็นตัวเลขน้อย ๆ และ/หรือมีเงื่อนไขอื่น ๆ ที่ซับซ้อน เช่น วัสดุคงคลังมีความยาวต่าง ๆ กัน มีจำนวนวัสดุคงคลังไม่เพียงพอ แนวทางการแก้ปัญหานี้จะใช้ Heuristic algorithms แบบต่าง ๆ ที่คิดค้นขึ้น ได้แก่ First fit decreasing, Next-fit decreasing, Best fit decreasing, Sequential Heuristic Procedure (SHP), Exhaustive Repetition Heuristic อย่างไรก็ตาม Heuristic algorithm ของ SHP มีความยุ่งยากซับซ้อนในการโปรแกรม และอาจได้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพดีอย่างไม่สม่ำเสมอ ขึ้นอยู่กับโจทย์ปัญหา

Pattern-based approach เป็นการตัดวัสดุซ้ำตามรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้นไว้ก่อน จะเหมาะกับโจทย์ปัญหาขนาดใหญ่ หรือกลุ่มประเภท Single Stock Size Cutting Stock Problem (SSSCSP) ที่มี D_i เป็นตัวเลขมาก ๆ ประเด็นของแนวทางการแก้ปัญหานี้ คือจะสร้างรูปแบบการตัดที่ดีได้อย่างไร และควรมีจำนวนเท่าไรดี ซึ่งหากสร้างรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้ทั้งหมดออกมาก็จะทำให้หาคำตอบในขั้นต่อไปได้ยากลำบาก แต่หากสร้างรูปแบบการตัดที่ดีได้แล้ว การหาคำตอบที่เป็นจำนวนการตัดซ้ำจะเป็นปัญหาที่มีลักษณะเป็น Optimization problem model โดยทั่วไป ซึ่งจะสามารถหาคำตอบได้หลายวิธี ได้แก่ Linear Programming (LP) Relaxation of Integer Problem (IP) และ Delayed Pattern Generation, Sequential Heuristic Procedure (SHP), Genetic Algorithm (GA), Evolutionary Programming (EP) อย่างไรก็ตามวิธี LP Relaxation of IP และ Delayed Pattern Generation เป็นวิธีที่ใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนแต่ทำให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด (optimal solutions) วิธี Genetic Algorithm (GA) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับวิธีการหาคำตอบแบบค้นสุ่มอย่างมีทิศทาง ด้วยการอาศัยความเร็วของคอมพิวเตอร์ปัจจุบันที่มีศักยภาพสูงในการประเมินคำตอบ แต่อย่างไรก็ตามคำตอบที่ได้อาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุดและอาจได้ค่าคำตอบที่ดีอย่างไม่สม่ำเสมอในแต่ละครั้ง

อย่างไรก็ตามข้อสรุปที่พบจากการศึกษาสำรวจสภาพปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นของประเทศไทยคือ หน้าที่การสร้างรูปแบบการตัดหรือจัดลำดับการตัดเป็นความรับผิดชอบของช่างเหล็กที่มีตำแหน่งเป็นหัวหน้าชุดหรือคนงาน ซึ่งอาจมีวิธีการในการจัดรูปแบบการตัดวัสดุหรือไม่มี ขึ้นอยู่กับ

อายุ ประสบการณ์ และนโยบายของผู้บริหาร โดยที่วิศวกรกลับไม่มีบทบาทในการทำหน้าที่นี้ แต่เพียงเตรียมรายการความต้องการ (bar cut list) ให้เท่านั้น ทั้งที่ปัญหาการตัดวัสดุเป็นปัญหาที่ซับซ้อนเกี่ยวข้องกับการคำนวณขั้นสูงจึงจะสามารถหาคำตอบที่ดีได้ วิธีการที่ช่างเหล็กใช้จึงเป็นเพียงการจัดรูปแบบด้วย algorithm อย่างง่ายที่คิดขึ้นเองโดยช่างเหล็กแต่ละคน มีลักษณะคล้ายคลึงกับ Next Fit Decreasing Algorithm ที่ไม่สมบูรณ์ และเป็นวิธีการที่ไม่ใช้เครื่องช่วยคำนวณจึงมีข้อจำกัดในประสิทธิภาพของการหาคำตอบ หรือในกรณีร้ายคือไม่มีการจัดรูปแบบการตัดวัสดุเลย โดยมีทัศนคติเพียงเพื่อให้สะดวกต่อการทำงาน และให้เหตุผลว่าวัสดุเชิงเส้นเหล่านี้มีการคิดราคาเผื่อความสูญเสียไว้เพียงพอแล้ว แต่จากการศึกษาสำรวจพบว่าอัตราการสูญเสียที่เป็นจริงสูงมาก (มากกว่า 10%) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาปรับปรุงวิธีการตัดวัสดุเชิงเส้นเพื่อลดการสูญเสียและชี้นำให้เห็นถึงผลประโยชน์ที่จะได้รับจากการตัดวัสดุอย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 รูปแบบการวิจัย

การวิจัยลักษณะคละของโจทย์ปัญหาและความต่อเนื่องของการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นนี้มีรูปแบบการวิจัยเป็นการพัฒนาแบบจำลองของปัญหาและวิธีการหาคำตอบ ซึ่งเมื่อได้แล้วจึงทำการทดสอบด้วยการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) จากนั้นจึงวิเคราะห์ผลคำตอบที่ได้ด้วยวิธีทางสถิติเพื่อสรุปผล มีรายละเอียดวิธีดำเนินการวิจัยดังนี้

3.2 การพัฒนาแบบจำลองของปัญหาและวิธีการหาคำตอบ

จากการทบทวนวรรณกรรมในบทก่อนหน้าทำให้ได้ข้อสรุปว่า ปัญหาการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นในงานก่อสร้างควรมีขนาดของปัญหาไม่เล็กเกินไป เพื่อให้เกิดขนาดคละของโจทย์ปัญหาในลักษณะที่เป็น Weakly heterogeneous assortment และวัสดุคงคลังโดยเฉพาะในกรณีวัสดุก่อสร้างที่เป็นเหล็กเส้นจะมีขนาดความยาวมาตรฐานที่จำหน่ายโดยทั่วไป ดังนั้นแนวทางการพัฒนาแบบจำลองของปัญหาและวิธีการหาคำตอบจะกำหนดให้ใช้แบบ Pattern-based approach ซึ่งเหมาะสมกับโจทย์ปัญหาขนาดใหญ่และวัสดุคงคลังมีขนาดมาตรฐานขนาดเดียวและมีจำนวนไม่จำกัด ซึ่งสอดคล้องกับสภาพการปฏิบัติงานจริง คำตอบของปัญหาการตัดที่ต้องการจะเป็นแผนการตัดที่ดีที่สุด (Optimal cutting plan) ซึ่งประกอบด้วยเซตของรูปแบบการตัดที่ประสิทธิภาพดี (A set of efficient cutting patterns) และจำนวนครั้งการตัดซ้ำรูปแบบ (Cutting times) เหล่านั้น โดยที่ทำให้ใช้วัสดุคงคลังจำนวนน้อยเส้นที่สุด (Minimum stock usage) หรือเสมือนกับการเกิดเศษการตัดน้อยที่สุด (Minimum cutting waste) สำหรับการตอบสนองต่อรายการความต้องการ (Demand list) ทั้งหมดที่กำหนด ซึ่งในการวิจัยนี้มีเป้าหมายหลักอยู่ 2 ประเด็น คือ ลักษณะคละของโจทย์ปัญหาที่มีผลต่อปริมาณเศษการตัดที่เกิดขึ้น และความต่อเนื่องของแผนการตัดที่ดีที่สุดที่หาได้ ซึ่งทั้งสองประเด็นมีความเป็นอิสระกันอยู่ แต่ประเด็นแรกเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นก่อนเนื่องจากเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับข้อมูลของโจทย์ปัญหาและต้องผ่านขั้นตอนการหาคำตอบแผนการตัดที่ดีที่สุดก่อนจึงจะสามารถนำมาคำนวณหาปริมาณเศษการตัดที่เกิดขึ้นได้ ส่วนประเด็นหลังจะเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นทีหลังเพราะเป็นการนำเอาแผนการตัดที่ดีที่สุดมาทำการจัดเรียงลำดับการตัดเพื่อให้เกิดความต่อเนื่องในการปฏิบัติงานมากที่สุด ในการดำเนินการวิจัยจึงพิจารณาทั้งสองประเด็นดังกล่าวนี้ตามลำดับ

3.2.1 ลักษณะคละของโจทย์ปัญหาที่มีผลต่อปริมาณเศษการตัดที่เกิดขึ้น

โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ตั้งโจทย์ปัญหาการตัดที่มีลักษณะคละของรายการความต้องการต่าง ๆ กัน ตามที่ต้องการทดสอบ

2. สร้างเซตเริ่มต้นของรูปแบบการตัดที่ประสิทธิภาพดีขึ้นมาจำนวนหนึ่งก่อน ด้วย Intensive Search Algorithm

3. สร้างแบบจำลองของปัญหาการตัดด้วย Linear Programming Relaxation of Integer Problem เพื่อหาจำนวนครั้งการตัดตามรูปแบบเหล่านั้น

4. ทำการหาคำตอบด้วยการใช้เทคนิค Delayed Pattern Generation และ Simplex Method ซึ่งทำให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด (optimal solution) ได้และเป็นค่าที่เท่าเดิมเสมอไม่ว่าจะทำการทดสอบกับตัวโจทย์นั้นกี่ครั้งก็ตาม จึงเหมาะในการนำค่าคำตอบที่ได้ในแต่ละชุดไปเปรียบเทียบกัน

5. นำแผนการตัดคำตอบไปทำการคำนวณหาปริมาณเศษการตัดที่เกิดขึ้น เพื่อการวิเคราะห์ประเมินผล

3.2.2 ความต่อเนื่องของแผนการตัดที่ดีที่สุดที่หาได้

โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. จากโจทย์ปัญหาการตัดอันหนึ่ง ทำการหาคำตอบเป็นแผนการตัดที่ดีที่สุด (optimal cutting plans) ที่แตกต่างกันขึ้นมาจำนวนหนึ่ง โดยที่แผนการตัดที่ดีที่สุดที่ให้ค่าปริมาณเศษการตัดน้อยที่สุดเท่ากันค่าหนึ่ง อาจมีได้หลากหลายแผนที่แตกต่างกัน ที่ประกอบด้วยเซตของรูปแบบการตัดที่ไม่เหมือนกันและจำนวนการตัดซ้ำที่ไม่เหมือนกัน

2. นำแผนการตัดที่เป็นคำตอบที่ดีสุด (รูปแบบการตัดที่ใช้ และจำนวนครั้งการตัด) แต่ละแผนเหล่านั้นมาจัดเรียงลำดับเพื่อให้เกิดความต่อเนื่องในการตัดที่ดีที่สุด ด้วยการใช้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการตรวจวัดปริมาณความไม่ต่อเนื่องในการตัด และ Genetic Algorithm based optimization ในการหาคำตอบที่ดีสุด เพื่อให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในการตัดน้อยที่สุด (minimization)

5. เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความไม่ต่อเนื่องในการตัดที่ตรวจวัดได้ระหว่างก่อนและหลังการทำ optimization เพื่อการวิเคราะห์ประเมินผล รวมทั้งหาความสัมพันธ์ของค่าความไม่ต่อเนื่องนี้กับจำนวนรูปแบบการตัดที่ใช้ และกับปริมาณเศษการตัดที่เกิดขึ้นจากแผนการตัดนี้

3.3 ตัวแปรในการวิจัย

ตัวแปรสำคัญที่ต้องการวิเคราะห์ความอ่อนไหวคือตัวแปรที่กำหนดลักษณะคละของรายการความต้องการที่เป็นตัวโจทย์ปัญหา ได้แก่ จำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i) ความยาวของท่อน (L_i) และจำนวนขนาดท่อนความยาวที่ต่างกัน (m) ซึ่งเป็นตัวโจทย์ปัญหาหรือเป็นข้อมูลนำเข้า (Inputs) ของ

แบบจำลอง และทำหน้าที่เป็นตัวแปรต้น (Independent variables) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรต้นเหล่านี้จะส่งผลให้คำตอบที่ได้เปลี่ยนแปลงตามไป คำตอบของแบบจำลองที่ใช้เป็นตัวแปรตาม (Dependent variables) ในการวิจัยนี้ ได้แก่ ปริมาณเศษการตัด และความต่อเนื่องของการตัด ซึ่งเป็นข้อมูลส่งออก (Outputs) ของแบบจำลอง

ตัวแปรต้นทั้ง 3 นี้จะถูกกำหนดให้มีค่าต่าง ๆ กัน ในช่วงที่เหมาะสม เพื่อหาความเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรตามที่สัมพันธ์กัน ซึ่งจะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม หรือข้อมูลนำเข้าและข้อมูลส่งออกของแบบจำลอง

จำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i) คือจำนวนท่อนที่ต้องการของแต่ละขนาดความยาว เช่น ขนาดความยาว 0.24 เมตร ต้องการเป็นจำนวน 15 ท่อน ค่าเริ่มต้นของตัวแปรนี้ในการทดสอบกำหนดให้เท่ากับ 15 ท่อน

ความยาวของท่อน (L_i) คือขนาดความยาวที่ต้องการที่มีความยาวต่าง ๆ กัน ซึ่งต้องสั้นกว่าวัสดุคงคลังมาตรฐานที่กำหนดให้เป็น 10.00 เมตร โดยค่าเริ่มต้นกำหนดให้มีขนาดความยาวของท่อนต่าง ๆ กัน จำนวน 18 ขนาด ได้แก่ 0.24, 0.69, 0.86, 1.13, 1.15, 1.89, 2.37, 2.82, 3.23, 4.25, 4.31, 4.53, 5.08, 5.16, 6.42, 7.85, 8.77, และ 9.42 เมตร ทั้งนี้ขนาดความยาวของท่อนที่ต้องการเหล่านี้มีลักษณะกระจายอย่างสุ่มครอบคลุมทุกช่วงขนาดความยาวที่เป็นไปได้ และยังจัดกลุ่มออกเป็น 6 กลุ่มช่วง กลุ่มช่วงละ 3 ขนาดความยาว

จำนวนขนาดท่อนความยาวที่ต่างกัน (m) คือจำนวนขนาดความยาวของท่อนที่ต้องการที่แตกต่างกัน โดยค่าเริ่มต้นกำหนดให้มีจำนวน 18 ขนาดที่แตกต่างกัน ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในตัวแปรก่อนหน้านี้

ร้อยละของปริมาณเศษการตัด (%waste) คือตัวแปรที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณเศษการตัดเพื่อให้เป็นไปอย่างมีมาตรฐานและสามารถนำค่าผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกันได้ จึงกำหนดให้ใช้ค่าปริมาณเศษการตัดเป็น ค่าร้อยละของปริมาณเศษการตัดรวมต่อปริมาณความยาวรวมของรายการความต้องการ (%waste) หรือเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\%\text{waste} = \left[\left(\sum_{j=1}^{n}\left(LS \cdot X_j\right) / \sum_{i=1}^{m}\left(L_i \cdot D_i\right)\right) - 1\right] \times 100$$

ผลรวมจำนวนขนาดความยาวที่ต้องการที่ยังตัดไม่เสร็จ (ω) หรือผลรวมของ open orders คือตัวแปรที่ใช้ในการตรวจวัดความไม่ต่อเนื่องในการตัดซึ่งเป็นผลมาจากลำดับของการตัดตามรูปแบบการตัดของแผนการตัดอันหนึ่ง ที่ริเริ่มขึ้นโดย Liang et al. (2002) หากค่า ω นี้มีค่าน้อยจะแสดงถึงว่าในงานการตัดนั้นมีลักษณะที่ตัดรายการความต้องการให้เสร็จไปทีละขนาดความยาว หรือมี open orders เกิดขึ้นน้อยในระหว่างงานการตัดนั้น โดยที่

$$\omega = \sum_{j=1}^{n}\left(\sum_{i=1}^{m} O_{ij}\right)$$

โดยที่ $O_{ij} = \begin{cases} 0; if \ \sum_{j=1}^{J}(a_{ij} \cdot X_j) = 0 \text{ , or } \sum_{j=1}^{J}(a_{ij} \cdot X_j) = D_i \\ 1; otherwise \end{cases}$

$\sum_i(O_{ij})$ คือ จำนวนขนาดที่แตกต่างกันของท่อนความยาวที่ยังตัดได้ไม่ครบจำนวน ที่ขณะหลังจากทำการตัดตามรูปแบบการตัดที่ J ไปแล้ว และจะตัดรูปแบบที่ J +1 ต่อไป

O_{ij} คือ สถานะแสดงการอยู่ในระหว่างตัดหรือไม่ (open status) ของขนาดท่อนความยาวขนาดหนึ่ง (L_i) ถ้าหากว่า L_i หนึ่งยังไม่ได้เริ่มถูกตัดจะมีสถานะเป็นปิดหรือมีค่าเท่ากับ 0 หากกำลังอยู่ในระหว่างการตัดแต่ยังไม่ครบจำนวนจะมีสถานะเป็นเปิดหรือมีค่าเท่ากับ 1 แล้วขณะที่ทำการตัดตามรูปแบบการตัด (cutting patterns) ต่าง ๆ มาจนถึงรูปแบบที่ J หากรวมจำนวนท่อนที่ได้ตัดออกมาแล้วได้ครบจำนวนความต้องการทั้งหมดแล้ว (D_i) ก็จะมีสถานะเป็นปิดหรือมีค่าเท่ากับ 0

3.4 สมมติฐานในการทดสอบ

จากตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่กำหนดไว้ในหัวข้อข้างต้น การทดสอบด้วยการวิเคราะห์ความอ่อนไหวจะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองกลุ่มนี้ เพื่อให้การวิเคราะห์เป็นไปอย่างชัดเจนและเข้าใจได้ง่าย จึงกำหนดให้ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามคราวละหนึ่งคู่เท่านั้น ทั้งนี้เพื่อควบคุมผลกระทบจากความสัมพันธ์กันเองระหว่างตัวแปรต้นที่มีต่อตัวแปรตาม โดยมีข้อสมมติฐานในระดับกว้าง และระดับละเอียดดังนี้

ข้อสมมติฐานในระดับกว้าง ได้แก่

ข้อที่ 1 ลักษณะคละของรายการความต้องการ (Demand assortment) มีความสัมพันธ์กับปริมาณเศษการตัด โดยยิ่งมีดีกรีความคละมาก (Strongly heterogeneous assortment) ยิ่งทำให้เกิดปริมาณเศษการตัดมาก แต่เนื่องจากมีตัวแปรหลายตัวที่กำหนดลักษณะคละของรายการความต้องการ ได้แก่ จำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i) ความยาวของท่อน (L_i) และจำนวนขนาดท่อนความยาวที่ต่างกัน (m) ดังนั้นจึงได้สร้างข้อสมมติฐานในระดับละเอียดด้วย

ข้อสมมติฐานในระดับละเอียด ได้แก่

ข้อที่ 2 จำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i) มีความสัมพันธ์กับปริมาณเศษการตัด โดยหากยิ่งมีค่ามากยิ่งทำให้ปริมาณเศษการตัดน้อย ทั้งนี้จำนวนท่อนที่ต้องการจะต้องมีค่าขั้นต่ำที่ไม่น้อยเกินไปจนไม่สามารถทำการตัดด้วยรูปแบบการตัดได้

ข้อที่ 3 ความยาวของท่อนที่ต้องการ (L_i) ซึ่งต้องมีขนาดสั้นกว่าความยาวของวัสดุคงคลัง เมื่อนำมาเทียบเป็นอัตราส่วนกับความยาววัสดุคงคลัง หรือ (L_i/LS) สามารถแบ่งกลุ่มช่วงของขนาดความความออกได้เป็น 6 ช่วง คือ กลุ่มช่วงขนาดสั้นอย่างมาก (tiny), สั้นมาก (very short), สั้น (short), ยาวปานกลาง (intermediate), ยาว (long), และ ยาวมาก (very long) ซึ่งรายการความต้องการที่มี

ขนาดท่อนในสัดส่วนของแต่ละกลุ่มช่วงแตกต่างกัน มีความสัมพันธ์กับปริมาณเศษการตัด โดยหากยิ่งมีความต้องการกลุ่มช่วงขนาดสั้นอย่างมากจำนวนมาก ยิ่งทำให้ปริมาณเศษการตัดน้อย และในทางกลับกันหากยิ่งมีความต้องการกลุ่มช่วงขนาดยาวมากจำนวนมาก ยิ่งทำให้ปริมาณเศษการตัดมาก

ข้อที่ 4 จำนวนขนาดท่อนความยาวที่ต่างกัน (m) มีความสัมพันธ์กับปริมาณเศษการตัด โดยหากยิ่งมีค่ามาก ยิ่งทำให้ปริมาณเศษการตัดมาก

ข้อที่ 5 ความต่อเนื่องของการตัดที่ดีสามารถทำได้ด้วยการจัดเรียงลำดับการตัดตามรูปแบบการตัด (cutting patterns) ของแผนการตัดที่ดีที่สุด (optimal cutting plan) เพื่อทำให้ได้ค่าผลรวม open orders ที่น้อยที่สุดได้ ซึ่งการลดลงของค่าผลรวม open orders จากการทำ optimization มีความสัมพันธ์กับจำนวนรูปแบบการตัดที่ใช้และกับปริมาณเศษการตัดของแผนการตัดนั้น

3.5 เครื่องมือที่ใช้

เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองและการหาคำตอบคือโปรแกรม Microsoft Excel 2013 ซึ่งเป็นโปรแกรมสำนักงานพื้นฐานประเภทกระดานคำนวณ (Spreadsheet) ที่เป็นที่นิยมแพร่หลาย มีความสามารถในการคำนวณตามสูตรที่กำหนดไว้พร้อม ๆ กันได้คราวละมาก ๆ มีลักษณะการนำเข้าและแสดงผลข้อมูลส่งออกแบบตาราง และแยกเป็นแผ่นงาน (sheets) จึงเหมาะสมกับงานที่ต้องการใช้อย่างยิ่ง นอกจากนี้ Microsoft Excel ยังมีโปรแกรมย่อยเสริม (Add-ins) ที่ใช้เพิ่มเติมความสามารถพิเศษอื่นขึ้นจากความสามารถพื้นฐาน ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้คือ Solver ที่มีความสามารถหาคำตอบของปัญหา Linear programming ได้ด้วยอาศัยวิธี Simplex method และยังสามารถคำนวณหา Shadow prices ของฟังก์ชันข้อจำกัดของแบบจำลองได้ด้วย

Microsoft Excel มีเครื่องมือที่ช่วยในการเขียนโปรแกรมส่วนเพิ่ม (Macros) ได้เองด้วยภาษา Visual Basic for Application (VBA) ทำให้สามารถสร้างชุดคำสั่งต่าง ๆ หรือวนรอบซ้ำอย่างต่อเนื่องตามต้องการ ให้เกิดเป็นโปรแกรมย่อยที่ช่วยให้ทำงานชุดคำสั่งหลายคำสั่งได้อย่างอัตโนมัติและรวดเร็วในคราวเดียว รวมทั้งการควบคุมสั่งงานโปรแกรม Solver ที่เป็น Add-Ins ของ Excel

นอกจากนี้ Microsoft Excel ยังสามารถใช้เป็นมีเครื่องมือที่ใช้เป็นตัวช่วยสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติได้อีกด้วย คือ โปรแกรม Data Analysis Tools ซึ่งเป็น Add-Ins ของ Excel

3.6 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลของการวิจัยนี้ได้จากการทดสอบแบบจำลองของปัญหาการตัดที่พัฒนาขึ้นและการหาคำตอบที่ดีที่สุดจากแบบจำลอง การทดสอบจะถูกออกแบบให้มีการแบ่งออกเป็นหลาย ๆ ชุดทดสอบ

โดยในแต่ละชุดทดสอบจะมีการปรับเปลี่ยนค่าของตัวแปรต้นไปทีละน้อยอย่างเป็นระบบ เพื่อให้สามารถสังเกตค่าความเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม ที่เป็นผลมาจากตัวแปรต้นนั้น

เริ่มต้นจากการกำหนดโจทย์ฐาน (base problem) ขึ้นก่อน ที่ใช้อ้างอิงค่าของตัวแปรต้นและตัวแปรตามก่อนที่จะเริ่มการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าว โดยโจทย์ฐานนี้จะสร้างขึ้นมาจากข้อมูลของงานการตัดเหล็กเส้นของโครงการก่อสร้าง

การสร้างชุดทดสอบต่าง ๆ ได้จากการปรับเปลี่ยนค่าของตัวแปรต้นจากเดิมที่ใช้ในโจทย์ฐานให้เป็นค่าใหม่ โดยอาจเป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างเป็นระบบและมีทิศทาง และบางตัวแปรต้นจะกำหนดให้มีการปรับเปลี่ยนค่าอย่างสุ่ม (random change) แต่มีการกำหนดช่วงของค่า (ขอบเขตบนและล่าง) สำหรับการสุ่มไว้ด้วย

ทั้งนี้เนื่องจากการปรับเปลี่ยนค่าของตัวแปรต้นในแต่ละชุดทดสอบเป็นแบบสุ่ม การสุ่มค่าแต่ละครั้งจะได้ค่าที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละครั้ง ซึ่งจะทำให้ได้ผลของค่าตัวแปรตามแตกต่างกันออกไปด้วย ดังนั้นจึงทำการทดสอบซ้ำหลายครั้งเป็นจำนวน 100 ครั้งกับชุดทดสอบแต่ละชุด เพื่อหาค่าคำตอบที่ได้ในแต่ละครั้งจำนวน 100 คำตอบนี้ แล้วนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์โดยเฉลี่ยทางสถิติ

3.7 สถิติที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ผลข้อมูลจะใช้หลักการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis testing) ทางสถิติ ซึ่งเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของข้อสมมติฐานที่ตั้งไว้ก่อนการวิเคราะห์ โดยการใช้ข้อมูลที่เก็บได้จากการทดสอบ ด้วยการประเมินเปรียบเทียบหาความเหมือนและความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญทางสถิติ (Significance tests) ของข้อมูลจากชุดทดสอบกลุ่มตัวอย่างสองชุดที่เป็นอิสระต่อกัน (two independent samples testes) หรือหลายชุด (*k* independent samples tests) วิธีการวิเคราะห์ได้แก่ t-Test และ ANOVA ซึ่งวิธีการทั้งสองอยู่ในกลุ่มประเภทการทดสอบแบบ Parametric tests ที่เป็นการเปรียบเทียบข้อมูลชนิด interval data

กรณีการทดสอบกลุ่มตัวอย่างสองชุดที่เป็นอิสระต่อกัน โดยทั่วไปการทดสอบ Significance tests จะมีการตั้งสมมติฐานไว้ 2 ประเภทคือ Null hypothesis (H_0) และ Alternative hypothesis (H_A) ซึ่ง Null hypothesis จะเป็นคำประกาศที่แสดงความไม่แตกต่างกันระหว่างค่าตัวแปรสองตัวที่นำมาเปรียบเทียบ ส่วน Alternative hypothesis จะเป็นคำประกาศที่มีตรรกะตรงข้ามกับ Null hypothesis นั้น การวิเคราะห์จะดำเนินการเพื่อยืนยันหรือปฏิเสธความไม่แตกต่างกันระหว่างค่าตัวแปรสองตัวที่ประกาศไว้ใน Null hypothesis

การตั้งสมมติฐานทางเลือก (Alternative hypothesis) จะมีคำประกาศที่เป็นได้สามลักษณะคือ “ไม่เท่ากัน” หรือ “มากกว่า” หรือ “น้อยกว่า” ซึ่งสัมพันธ์กับรูปแบบการทดสอบแบบ Two-tailed test และ One-tailed test หากเป็น Two-tailed test จะเป็นการทดสอบว่า “ไม่เท่ากัน” ซึ่งไม่มีทิศทางที่ชัดเจนแต่เป็นไปได้ทั้งมากกว่าหรือน้อยกว่า ส่วน One-tailed test จะเป็นการทดสอบที่กำหนดทิศทางไว้ว่าจะเป็น “มากกว่า” หรือ “น้อยกว่า”

การคำนวณค่า *t*-Test ในกรณีที่สมมติให้ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างทั้งสองกลุ่มมาจากประชากรที่มีค่าความแปรปรวนไม่เท่ากัน (assuming unequal population variances) เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างทั้งสองมีความเป็นไปได้ที่จะมาจากประชากรที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากันหรือไม่ มีสูตรในการคำนวณค่า *t*-Test ดังนี้

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)0}{\sqrt{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)}}$$

โดยที่ให้ $\bar{x}_1$ และ $\bar{x}_2$ เป็นค่าเฉลี่ย (means) ของข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ 1 และ 2

S_1 และ S_2 เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviations) ของกลุ่มตัวอย่างที่ 1 และ 2

μ_1 และ μ_2 เป็นค่าเฉลี่ย (means) ของข้อมูลของประชากรของกลุ่มที่ 1 และ 2

n_1 และ n_2 เป็นจำนวนของข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ 1 และ 2

ถ้าข้อมูลชุดที่ 1 และ 2 มีการกระจายแบบปกติ หรือจำนวนของข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ 1 และ 2 มีขนาดใหญ่พอที่จะอ้าง Central Limit Theorem

และการคำนวณหา Degrees of freedom ของข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างทั้งสองได้จาก

$$d.f. = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}}$$

ซึ่งจะนำ *d.f.* ไปใช้ในการหาค่า *t*-critical

กรณีการทดสอบกลุ่มตัวอย่างหลายชุดที่เป็นอิสระต่อกัน โดยมีกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป จะใช้วิธีการทดสอบ ANOVA (Analysis of Variances) เป็นการทดสอบสมมติฐาน Null hypothesis ว่าข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มมาจากประชากรเดียวกัน และต่อสู้ยันกับสมมติฐาน Alternative hypothesis ที่ว่าข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างเหล่านี้ไม่ได้มาจากประชากรเดียวกัน โดยจะกำหนดใช้ค่าตัวแปรเดียวเท่านั้นในการทดสอบ (one-way ANOVA หรือ single-factor ANOVA) ค่าทางสถิติที่ใช้ในการทดสอบคือ *F* ratio ซึ่งหาได้จาก

$$F = \frac{Between - groups\ variance}{Within - groups\ variance} = \frac{(Sum\ of\ Squares/Degrees\ of\ freedom)_{between}}{(Sum\ of\ Squares/Degrees\ of\ freedom)_{within}}$$

โดยที่ Sum of Squares = the sum of the squared deviations

และใช้ degrees of freedom ระหว่างกลุ่ม และภายในกลุ่ม (between-groups degrees of freedom and within-groups degrees of freedom) ซึ่งมีค่าเท่ากับ (k – 1) และ (n – k) ตามลำดับ เมื่อ k คือจำนวนกลุ่มข้อมูลและ n คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด ไปใช้หาค่า F critical

บทที่ 4 แบบจำลองปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นสำหรับงานก่อสร้าง

4.1 หลักการของแบบจำลองปัญหา

วัสดุคงคลังเชิงเส้นที่นำมาใช้เป็นกรณีศึกษาสำหรับการวิจัยนี้คือเหล็กเส้น เนื่องจากเหล็กเส้นเป็นวัสดุหลักสำคัญที่มีปริมาณการใช้สูงในงานก่อสร้างโดยเฉพาะงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่นิยมในประเทศไทย เหล็กเส้นยังมีราคาต้นทุนต่อหน่วยสูงเมื่อเทียบกับวัดสุเชิงเส้นอื่น ๆ ของโครงการ ผลจากการศึกษาเหล็กเส้นนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับวัสดุก่อสร้างประเภทอื่นได้เช่นกัน ได้แก่ เหล็กรูปพรรณ ท่อเหล็ก ท่อพีวีซี และไม้ เป็นต้น การวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นสำหรับงานก่อสร้าง ด้วยแบบจำลอง One dimensional cutting stock problem (1D-CSP) ซึ่งมีเป้าหมายในการวางแผนการตัด (cutting plan) ที่ตอบสนองต่อรายการความต้องการทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วยขนาดความยาวที่ต้องการที่แตกต่างกัน (different demanded lengths: L_i) จำนวน m ขนาด และแต่ละขนาดต้องการเป็นจำนวนท่อนที่ต่างกัน (demanded numbers: D_i) โดยการกำหนดใช้วัสดุคงคลังที่มีจำนวนไม่จำกัด และมีขนาดมาตรฐานเพียงขนาดเดียว (length of LS units) ซึ่งกรณีวัสดุวัสดุเหล็กเส้นกำหนดให้ LS = 10.00 เมตร แผนการตัดที่เป็นคำตอบของปัญหาจะประกอบด้วย รูปแบบการตัดต่าง ๆ กัน (cutting patterns: $P_j = [A_{ij}]$) ที่กำหนดส่วนผสมของท่อนความยาวที่ต้องการต่าง ๆ สำหรับตัดวัสดุคงคลังหนึ่งเส้น และจำนวนครั้งของการตัดซ้ำตามรูปแบบเหล่านั้น (cutting times: X_j) โดยที่ i เป็นเลขดัชนี ตั้งแต่ 1 ถึง m; j เป็นเลขดัชนี ตั้งแต่ 1 ถึง n; A_{ij} เป็นจำนวนท่อนของ L_i ที่ปรากฏในรูปแบบการตัด P_j

4.2 สมการของแบบจำลองปัญหา 1D-CSP

ส่วนประกอบหลักของแบบจำลองปัญหา 1D-CSP แบ่งเป็น 3 ส่วนเหมือนกับแบบจำลองปัญหาการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยทั่วไป (Optimization problem models) คือ ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variables) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraint functions) ซึ่งรายละเอียดของส่วนประกอบหลักของแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีดังนี้

ตัวแปรตัดสินใจของแบบจำลองปัญหานี้คือจำนวนครั้งของการตัดตามรูปแบบการตัดที่ j (มีการเตรียมเซตของรูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพดีไว้แล้ว) ซึ่งใช้ค่าตัวแปรดังนี้

ตัวแปรตัดสินใจ: X_j

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแบบจำลองได้ใช้ค่าผลรวมของจำนวนเส้นของวัสดุคงคลังทั้งหมดที่ใช้ในงานการตัด โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ได้ค่าที่น้อยที่สุด

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์: Minimize $\sum_{j=1}^{n}(X_j)$ (1)

ฟังก์ชันข้อจำกัดประกอบด้วยเงื่อนไข 3 ข้อหลักได้แก่ ข้อจำกัดด้านจำนวนท่อนที่ต้องการ ข้อจำกัดด้านคำตอบที่เป็นตัวเลขจำนวนบวกและจำนวนเต็ม และข้อจำกัดด้านความยาวของวัสดุคงคลังมาตรฐาน ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้ตามลำดับ

เงื่อนไขข้อจำกัด: $\sum_j (A_{ij}X_j) \geq D_i$ (สำหรับ i = 1 ถึง m) (2)

$X_j \geq 0$ และ $X_j \in \mathbb{N}$

$\sum_i A_{ij}L_i \leq LS$ (สำหรับรูปแบบการตัดที่ j) (3)

เศษการตัดที่เกิดจากรูปแบบการตัด j ใด ๆ (T_j) สามารถคำนวณได้จากสมการ:

$$T_j = LS - \sum_i A_{ij}L_i \quad (4)$$

4.3 วิธีการแก้ปัญหา 1D-CSP

การแก้ปัญหา 1D-CSP นี้ได้เลือกใช้แนวทาง pattern-oriented approach เนื่องจากเหมาะสมสำหรับกรณีที่ใช้วัสดุคงคลังขนาดมาตรฐานขนาดเดียว (Single stock size) ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนหลักสองขั้นคือ การสร้างเซตเริ่มต้นของรูปแบบการตัดที่ประสิทธิภาพดี (Preparation of initial set of efficient cutting patterns) และการหาจำนวนครั้งของการตัดตามรูปแบบการตัดต่าง ๆ (Determination of cutting times) โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 การสร้างเซตเริ่มต้นของรูปแบบการตัดที่ประสิทธิภาพดี

รูปแบบการตัดที่มีประสิทธิภาพดีหมายถึง รูปแบบการตัดที่เป็นไปได้ (feasible) และมีเศษการตัดน้อย เนื่องจากโจทย์ปัญหาที่มีความต้องการขนาดท่อนความยาวที่แตกต่างกันจำนวน m ขนาด อาจมีรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้จำนวนมากมายมหาศาลแม้ค่าของตัวแปร m จะเป็นค่าไม่มากและอยู่ในวิสัยของปัญหาในทางปฏิบัติจริง รูปแบบการตัดที่เป็นไปได้นั้นคือรูปแบบที่เกิดจากส่วนผสมของขนาดท่อนความยาวที่ต้องการต่าง ๆ ด้วยจำนวนท่อนต่าง ๆ กันที่เป็นเลขจำนวนเต็มเท่านั้น แล้วผลรวมของความยาวยังคงมีค่าไม่เกินกว่าความยาวของวัสดุคงคลัง หรือสอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (3) การสร้างรูปแบบการตัดให้มีเศษการตัดน้อยนั้นจะต้องมีการคัดเลือกส่วนผสมเหล่านี้ให้เหมาะสม ในการวิจัยนี้ได้นำ Intensive Search Algorithm (Benjaoran and Bhokha 2013) มาใช้ในขั้นตอนการสร้าง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

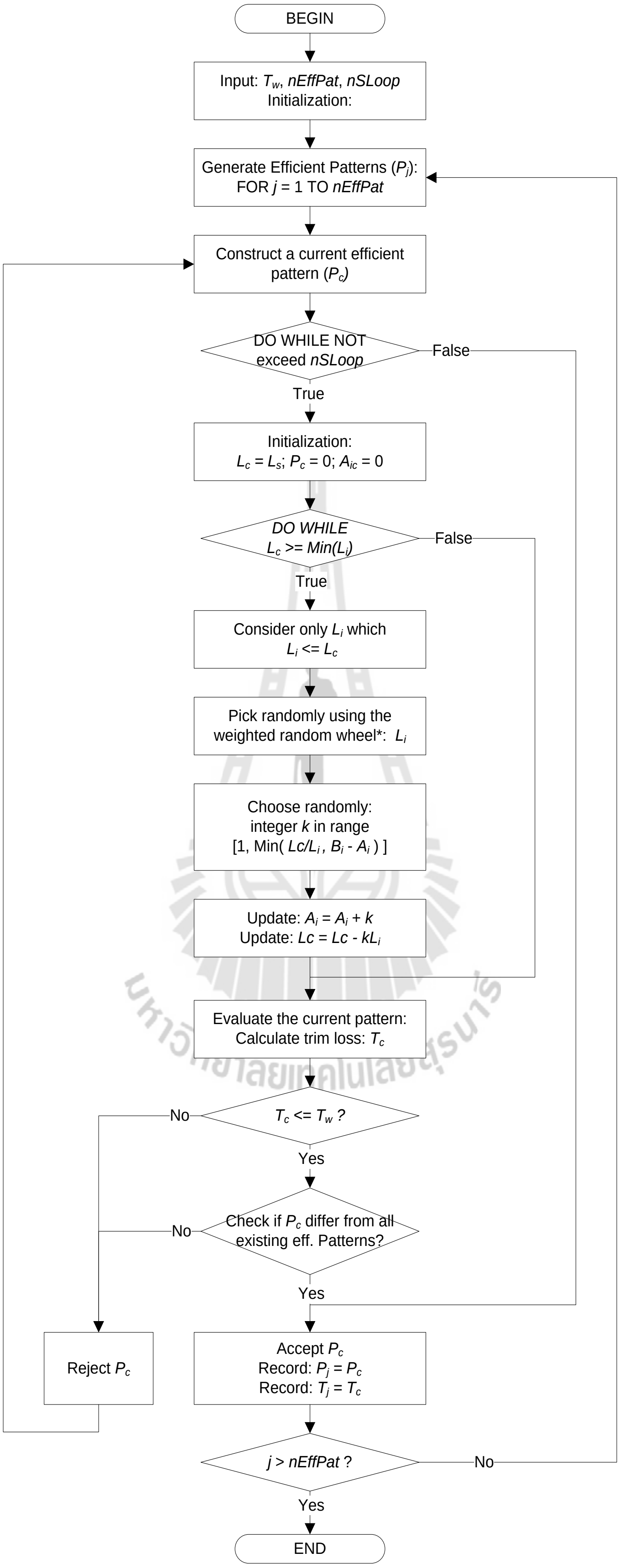
Intensive Search Algorithm มีการพัฒนาต่อยอดมาจาก Random Search Algorithm (Vahrenkamp 1996) ซึ่งเป็นวิธีการสร้างรูปแบบการตัดที่อาศัยวิธีการสุ่มเลือกส่วนผสมของขนาดท่อนความยาวที่ต้องการต่าง ๆ ด้วยจำนวนท่อนต่าง ๆ กัน แล้วจึงทำการตรวจสอบผลรวมของความยาว

หากได้ตามเงื่อนไขก็จะนำไปพิจารณาต่อไป แต่หากผิดเงื่อนไขก็ยกเลิกแล้วกลับไปทำการสุ่มเลือกส่วนผสมต่าง ๆ ใหม่อีกครั้ง ซึ่งการพิจารณาในขั้นต่อไปจะเป็นการเปรียบเทียบเศษการตัดที่เกิดขึ้นกับเศษการตัดที่ยอมรับได้ (allowable trim loss: T_w) ที่เป็นค่าที่กำหนดไว้ก่อน และความมีเศษการตัดที่สั้นกว่าท่อนความยาวที่ต้องการที่สั้นที่สุด หรือ $T_j \leq Min\,(L_i)$ ผลการวิจัยพบว่า Random Search Algorithm นี้สามารถสร้างรูปแบบการตัดที่ประสิทธิภาพดีขึ้นเป็นจำนวนมากได้อย่างรวดเร็ว

อย่างไรก็ตาม เซตของรูปแบบการตัดที่ประสิทธิภาพดีอาจจะไม่ทำให้ได้คำตอบของปัญหาที่ดีเสมอไป เพราะการตัดวัสดุคงคลังจำเป็นต้องตัดให้ได้จำนวนครบตามท่อนความยาวที่ต้องการต่าง ๆ ความหลากหลายของรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้น (ความหลากหลายของส่วนผสมที่นำมาสร้าง) น่าจะช่วยให้มีโอกาสทำให้ได้คำตอบที่ดีมากกว่า แต่การสุ่มโดยสมบูรณ์อาจทำให้เกิดการเลือกส่วนผสมที่สะเปะสะปะไร้ทิศทาง และในกรณีที่มีจำนวนท่อนความยาวที่ต่างกัน (m) จำนวนมาก อาจจะทำให้ได้ผลลัพธ์เป็นเซตของรูปแบบการตัดที่มีไม่ครบทุก L_i ซึ่งทำให้ L_i ที่ไม่ปรากฏอยู่ในเซตของรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้นจะไม่สามารถถูกตัดออกมาได้ และมีแนวโน้มจะสร้างรูปแบบการตัดที่มี L_i ขนาดท่อนสั้น ๆ จำนวนมาก ดังนั้น Intensive Search Algorithm ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ที่ยังคงใช้หลักการของการเลือกส่วนผสมและสร้างรูปแบบการตัดแบบสุ่มของ Random Search Algorithm แต่เพิ่มความสามารถในการสร้างรูปแบบการตัดที่หลากหลายไม่ซ้ำกันในแต่ละครั้ง โดยการควบคุมการสุ่มให้เป็นไปในทิศทางที่ต้องการ คือกำหนดให้โอกาสการใช้ L_i ใด ๆ ไปสร้างรูปแบบการตัดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนความต้องการ D_i จึงทำให้ได้ผลลัพธ์เป็นเซตของรูปแบบการตัดที่ประสิทธิภาพดีและมีความหลากหลายของ L_i ครบทุกขนาดความต้องการสอดคล้องตามโจทย์ปัญหาการตัด โดยตัว algorithm มีขั้นตอนดังแสดงในรูปแผนภาพ ลำดับขั้นตอน (Flowchart) ข้างล่างนี้

ขั้นตอนย่อยที่สำคัญใน algorithm คือ การสุ่มเลือก L_i ตามโอกาสความน่าจะเป็นด้วยการใช้ล้อหมุนสุ่มแบบถ่วงน้ำหนัก (weighted random wheel) ที่ใช้ค่าดัชนี V_i (Availability Index) ในการควบคุมการสุ่มแบบถ่วงน้ำหนักนี้ ค่าดัชนี V_i นี้คือสัดส่วนระหว่างจำนวนท่อนความยาวที่ i ที่ต้องการกับผลรวมจำนวนตัดที่เกิดขึ้นในรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้นแล้วในขณะนั้น แต่ละ L_i จะมีค่า V_i ที่คำนวณได้ของตัวเอง และค่า V_i นี้จะเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ ตลอดช่วงเวลาของกระบวนการสร้างรูปแบบการตัด

$$V_i = \begin{cases} \frac{D_i}{\sum_{i=1}^{c} A_{ij}};\ \text{if } \sum_{i=1}^{c} A_{ij} > 0 \\ \text{10,000 or big number; otherwise} \end{cases}$$



รูปที่ 4.1 ลำดับขั้นตอน (Flowchart) ของ Intensive Search Algorithm

ซึ่งหากค่า V_i มีค่ามากหมายถึงว่า ในเซตของรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้นแล้วยังคงมี L_i นี้อยู่น้อย จึงควรเพิ่มโอกาสในการนำ L_i นี้ มาสร้างเป็นรูปแบบการตัดปัจจุบัน (current cutting pattern) ดังนั้น การสร้างรูปแบบการตัดปัจจุบันจึงใช้การสุ่มแบบถ่วงน้ำหนักเพื่อเพิ่มโอกาสการเลือกนำ L_i ที่มีค่าดัชนี V_i ที่มากกว่า ในทุกครั้งของการสุ่มหยิบ ในทางตรงข้ามหาก L_i ใดถูกนำไปใช้สร้างเป็นรูปแบบการตัดแล้วหลายครั้ง ก็ควรลดโอกาสการถูกเลือกอีกในการสร้างรูปแบบอันถัด ๆ ไป ด้วยการปรับปรุงค่า V_i ให้น้อยลง และค่า V_i ของแต่ละ L_i นี้จะเปลี่ยนแปลงไปในทางลดลงเรื่อย ๆ เมื่อมีการสร้างรูปแบบการตัดที่ j ใหม่ ๆ ขึ้น

นอกจากแผนภาพ ลำดับขั้นตอน (Flowchart) แล้ว 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 >= 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, D_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
```

โดยที่ให้ T_w คือ เศษการตัดที่ยอมรับได้จากรูปแบบการตัดใด ๆ

T_c คือ เศษการตัดปัจจุบันจากรูปแบบปัจจุบัน

P_c คือ รูปแบบการตัดปัจจุบันที่ได้จากการสุ่ม

L_c คือ ความยาวปัจจุบันของวัสดุ

LS คือ ความยาวของวัสดุคงคลัง

L_i คือ ขนาดความยาวที่ต้องการ สำหรับ i ตั้งแต่ 1 ถึง m

D_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

ผลลัพธ์ที่ได้จาก algorithm คือเซตของรูปแบบการตัดที่แตกต่างไม่ซ้ำกันเลยจำนวนทั้งหมดเท่ากับ *nEffPat* รูปแบบตามที่กำหนดไว้ และภายในเซตจะต้องประกอบด้วยขนาดความยาวที่ต้องการครบทุกขนาดของโจทย์และยังมีจำนวนมากน้อยสอดคล้องกับโจทย์อีกด้วย แต่ละรูปแบบให้เศษการตัดไม่เกินกว่าเศษที่ยอมรับได้ที่กำหนดไว้ ($T_j \le T_w$) ทั้งนี้ในขั้นตอนการสร้างจะมีการวนรอบซ้ำตามโปรแกรมเพื่อเลือกส่วนผสมและนำมาสร้างรูปแบบเช่นนี้ เพื่อให้ระยะเวลาในการสร้างสามารถควบคุมได้จึงมีการกำหนดจำนวนวนรอบสูงสุดในการสุ่มสร้างไว้เท่ากับ *nSLoop* รอบ อย่างไรก็ตามหากมีการวนรอบสร้างถึงจำนวนรอบสูงสุดที่กำหนดแล้วรูปแบบการตัดที่ได้นั้นจะยอมให้เป็นรูปแบบที่มี T_j มากกว่า T_w ได้ เซตของรูปแบบการตัดที่ได้นี้จะเป็นเซตเริ่มต้นที่จะนำไปใช้หาคำตอบที่ดีที่สุด (optimal solution) ของปัญหาการตัดในขั้นตอนต่อไป

4.3.2 การหาจำนวนครั้งของการตัดซ้ำตามรูปแบบการตัดต่าง ๆ

ขั้นตอนภายหลังจากที่มีเซตเริ่มต้นของรูปแบบการตัดที่ประสิทธิภาพดีแล้วคือการสร้างแบบจำลองของปัญหาเชิงเส้นของเลขจำนวนเต็ม (Integer Programming) เพื่อหาคำตอบเป็นจำนวนครั้ง (เลขจำนวนเต็ม) ของการตัดซ้ำตามรูปแบบ ด้วยการอาศัยหลักการแยกส่วนปัญหาหรือ decomposition เทคนิค Delayed Pattern Generation Technique ที่เสนอโดย (Gilmore and Gomory 1961; 1963) จะทำการลดขนาดที่แท้จริงของปัญหาให้เล็กลงอย่างเหมาะสม จากที่ต้องใช้

รูปแบบการตัดที่เป็นไปได้ทั้งหมดมาพิจารณาในการแก้ปัญหา ซึ่งนั้นจะทำให้ปัญหามีขนาดใหญ่มาก และร่วมกับการปรับลดเงื่อนไขด้านจำนวนเต็มของคำตอบเป็นจำนวนจริง the Linear Programming relaxation of Integer Problem จึงทำให้สามารถทำการหาคำตอบที่ดีสุดได้ด้วยวิธีการทั่วไปคือ Simplex method ได้ ข้อดีของวิธีการแก้ปัญหานี้คือทำให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด (optimal solution) เสมอสำหรับโจทย์ปัญหาใด ๆ

เทคนิค Delayed Pattern Generation Technique มีรายละเอียดเริ่มจาก กำหนดให้เซตเริ่มต้นของรูปแบบการตัดที่แตกต่างกันมีจำนวนจำกัดที่ J รูปแบบ ซึ่งเป็น restricted problem จากนั้นทำการหาคำตอบด้วยวิธี Simplex method แล้วจึงสร้างปัญหาย่อยขึ้นตามสมการที่ (5) และ (6) ทั้งนี้เพื่อที่จะนำคำตอบจากปัญหาย่อยนี้มาสร้างเป็นรูปแบบการตัดอันใหม่ขึ้นมาหนึ่งอัน (หากจำเป็น) ลักษณะของปัญหาย่อยที่สร้างขึ้นจากสมการที่ (5) และ (6) ก็คือปัญหากระเป๋าเป้ (Knapsack problem) รูปแบบการตัดใหม่ที่สร้างขึ้นจะถูกเพิ่มเข้าไปในเซตทำให้ได้จำนวนรูปแบบเพิ่มเป็น $J + 1$ รูปแบบ วนรอบทำซ้ำเช่นนี้จนกว่าจะได้คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาเต็ม (master problem) โดยตรวจสอบได้จากค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (5) ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0

Minimize $\quad 1 - \sum_{i=1}^{m}\left(\pi_i^J A_{ij}\right) \quad (5)$

เงื่อนไขข้อจำกัด: $\quad \sum_{i=1}^{m}\left(L_i A_{ij}\right) \leq LS \quad (6)$

$A_{ij} \geq 0$ และ $A_{ij} \in \mathbb{N}$

โดยที่ให้ π_i^J เป็นราคาเงาของคำตอบที่ดีที่สุด (the optimal shadow prices)

ภายหลังจากที่ได้คำตอบที่ดีที่สุดจาก restricted problem แล้ว ซึ่งนี่จะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดของ master problem ด้วย แต่ทั้งนี้คำตอบที่ได้จะเป็นตัวเลขจำนวนจริงจึงต้องทำการปัดให้เป็นเลขจำนวนเต็มอีกครั้ง หากว่าโจทย์ปัญหาที่พิจารณานี้มีค่า D_i มาก ๆ การปัดตัวเลขของคำตอบให้เป็นจำนวนเต็มจะไม่ส่งผลกระทบมาก คำตอบที่ได้หลังจากการปัดจะยังคงเป็นคำตอบที่ดีที่ยอมรับได้

4.3.3 ผลรวมปริมาณเศษการตัดจากคำตอบ

คำตอบแผนการตัดที่ดีที่สุดนั้นจะใช้จำนวนวัสดุคงคลังน้อยที่สุด (minimal total stock usage) ซึ่งหากพิจารณาว่าปริมาณรายการความต้องการรวมทั้งหมด (total demand) เป็นค่าที่คงที่แน่นอน แสดงว่าการใช้จำนวนวัสดุคงคลังน้อยที่สุดเปรียบได้กับการเกิดปริมาณเศษการตัดรวมน้อยที่สุดด้วย (minimal total cutting waste) ดังสมการข้างล่างนี้

(total cutting waste) = (total stock usage) – (total demand)

total cutting waste = $\sum_{j=1}^{n}(X_j \cdot LS) - \sum_{i=1}^{m}(L_i \cdot D_i)$ (7)

นอกจากนี้ ปริมาณเศษการตัดด้วยแผนการตัดอิงรูปแบบการตัด (pattern-oriented cutting plan) จะมาจาก ผลรวมของเศษจากรูปแบบการตัด และปริมาณท่อนความยาวที่เกินความต้องการ (oversupplied pieces) ซึ่งอาจคำนวณปริมาณเศษการตัดรวมได้จากสมการข้างล่างนี้

(total cutting waste) = (total trim loss of cutting patterns) + (total oversupplies)

$$\text{total cutting waste} = = \sum_{j=1}^{n}(X_j \cdot T_j) + \sum_{i=1}^{m}\left(L_i \cdot \left(\sum_{j=1}^{n}(A_{ij}X_j) - D_i\right)\right) \quad (8)$$

ในการอ้างอิงเปรียบเทียบเศษการตัดระหว่างโจทย์ปัญหาหลาย ๆ โจทย์ การใช้ค่าร้อยละของปริมาณเศษการตัดรวม (%waste) จะเป็นค่าที่เหมาะสม คำนวณได้ดังสมการข้างล่างนี้

(%waste) = (total cutting waste) / (total demand) x 100

$$\%\text{waste} = \left(\sum_{j=1}^{n}(X_j \cdot LS) / \sum_{i=1}^{m}(L_i \cdot D_i) - 1\right) \times 100 \quad (9)$$

โดยที่ให้ n เป็นจำนวนรูปแบบการตัดทั้งหมดที่ใช้ในแผนการตัดที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด

4.4 การโปรแกรมแบบจำลองด้วยโปรแกรมกระดานคำนวณ

แบบจำลองปัญหาการตัด 1D-CSP นี้ได้ถูกนำไปพัฒนาต่อด้วยโปรแกรมกระดานคำนวณ (Spreadsheet) โดยได้เลือกใช้โปรแกรม Microsoft Excel™ 2013 เนื่องจากเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปประเภท Spreadsheet ที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยตัวแบบจำลองปัญหาจะถูกบันทึกเป็นไฟล์หนึ่งไฟล์ ที่ประกอบด้วยแผ่นงาน (Sheet) เพียงแผ่นเดียวชื่อว่า “Model” ที่ใช้ป้อนบันทึกสูตรของสมการต่าง ๆ ทั้งหมดของแบบจำลอง และจัดวางอย่างเป็นระเบียบในรูปแบบตารางต่าง ๆ โดยแบ่งพื้นที่สำหรับการใช้งานในหน้าที่ต่าง ๆ กัน ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการป้อนข้อมูลนำเข้า (input) และเพื่อแสดงข้อมูลผลลัพธ์ (output) ให้เข้าใจได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีการเรียกใช้งานโปรแกรมส่วนเพิ่ม (add-ins program) เพื่อช่วยในการคำนวณและหาคำตอบ และการเขียนชุดคำสั่ง (macros) ด้วยภาษา VBA เพื่อให้โปรแกรมเกิดการทำงานโดยอัตโนมัติ ส่วนประกอบของแบบจำลองบน Excel แบ่งพื้นที่ของแผ่นงานออกเป็น 4 ส่วนคือ ข้อมูลโจทย์ปัญหาและค่าพารามิเตอร์ เซตของรูปแบบการตัดและคำตอบที่ดีที่สุด การคำนวณค่าที่เกี่ยวข้องกับแผนการตัด และการคำนวณประเมินแผนการตัดคำตอบ พื้นที่แผ่นงานที่ใช้เป็นตัวแบบจำลองทั้งหมดมีขนาดใหญ่กว่าที่จะแสดงได้ในหนึ่งหน้าจึงจำเป็นต้องแบ่งแสดงออกเป็นส่วน ๆ ดังรูปต่าง ๆ ข้างล่าง มีรายละเอียดดังนี้

4.4.1 ข้อมูลโจทย์ปัญหาและค่าพารามิเตอร์

ส่วนข้อมูลโจทย์ปัญหาและค่าพารามิเตอร์คือพื้นที่สำหรับป้อนข้อมูลนำเข้าจากผู้ใช้งาน เป็นตัวโจทย์ปัญหาการตัดของโครงการก่อสร้างที่ต้องการหาคำตอบ และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในขั้นตอนการหาคำตอบ

	Input Data		
	LS	10.00	
	m	18	
	Tw	0.20	
	nEffPat	40	
	Gen. Method	2	
	Total Di	270	
	Avg. Di	15	
	Total De	1052.55	
i	***Li***	***Di***	***Sum(Di)***
1	0.24	15	Group1 45
2	0.69	15	
3	0.86	15	
4	1.13	15	Group2 45
5	1.15	15	
6	1.89	15	
7	2.37	15	Group3 45
8	2.82	15	
9	3.23	15	
10	4.25	15	Group4 45
11	4.31	15	
12	4.53	15	
13	5.08	15	Group5 45
14	5.16	15	
15	6.42	15	
16	7.85	15	Group6 45
17	8.77	15	
18	9.42	15	

รูปที่ 4.2 ข้อมูลโจทย์ปัญหาและค่าพารามิเตอร์

ค่าพารามิเตอร์ เป็นค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในขั้นตอนการหาคำตอบ ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดให้โดยผู้ใช้งาน แต่ในการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเบื้องต้นและทำการกำหนดค่าที่เหมาะสมให้กับพารามิเตอร์เหล่านี้ ซึ่งจะใช้เป็นค่าที่คงที่ตลอดการทดลองทั้งหมด ได้แก่ ความยาวของวัสดุคงคลัง (*LS*) = 10.00; จำนวนขนาดความยาวที่ต้องการที่แตกต่างกัน (*m*) = 18; เศษของรูปแบบการตัดที่ยอมรับได้ (T_w) = 0.20; จำนวนรูปแบบการตัดที่ประสิทธิภาพดีในเซตเริ่มต้น (*J*) = 40; อัลกอริทึมที่ใช้ในการสร้างรูปแบบการตัดเริ่มต้น (*Gen. Method*) = 2 (หมายถึง Intensive Search Algorithm)

ข้อมูลโจทย์ปัญหา ประกอบด้วยข้อมูลพื้นฐานสองอย่างคือ ขนาดความยาวที่ต้องการ (L_i) และจำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i) ซึ่งข้อมูลที่แสดงในรูปตัวอย่างเป็นโจทย์ปัญหาฐาน (base problem) ที่ใช้ในการทดสอบ (รายละเอียดในหัวข้อการทดสอบ) นอกจากนี้ยังมีการแสดงค่าที่คำนวณได้ข้อมูลพื้นฐานของโจทย์ ได้แก่ จำนวนท่อนที่ต้องการทั้งหมด (*Total* D_i); จำนวนท่อนที่ต้องการเฉลี่ยต่อหนึ่งขนาดความยาว (*Avg.* D_i); ผลรวมปริมาณความต้องการทั้งหมด (*Total De*) ซึ่งเป็นความยาวรวมของความต้องการทั้งหมดของโจทย์; รวมทั้งกำหนดแบ่งกลุ่มขนาดท่อนความยาวที่ต้องการออกเป็นช่วงความยาวต่าง ๆ กัน 6 กลุ่มช่วง ซึ่งสามารถกำหนดจำนวนผลรวมของจำนวนท่อนที่ต้องการของแต่ละกลุ่มได้ (*Sum*(D_i))

ผู้ใช้งานสามารถป้อนโจทย์ปัญหาตามต้องการได้ด้วยการนำเข้าข้อมูลพื้นฐาน L_i, D_i, $Sum(D_i)$ และปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ตามที่เห็นเหมาะสม

4.4.2 เซตของรูปแบบการตัดและคำตอบที่ดีที่สุด

ส่วนของเซตของรูปแบบการตัดและคำตอบที่ดีที่สุดคือพื้นที่สำหรับการบันทึกและคำนวณค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับรูปแบบการตัดที่ประสิทธิภาพดี (Efficient cutting patterns) ที่สร้างขึ้น และจำนวนครั้งของการตัดซ้ำ (Cutting times) ที่ได้จากกระบวนการหาคำตอบที่ดีที่สุด

รูปแบบการตัดที่ประสิทธิภาพดีเกิดขึ้นในสองช่วง คือ ช่วงแรกเกิดจาก Intensive Search Algorithm ที่ใช้สร้างเซตเริ่มต้น โดยมีจำนวนรูปแบบทั้งหมด *nEffPat* ตามที่ผู้ใช้กำหนด ในกรณีนี้กำหนดใช้ค่าเท่ากับ 60 ตลอดการทดสอบ และช่วงที่สองเกิดจากการแก้ปัญหากระเป๋าเป้ (Knapsack Problem) ในขั้นตอนการหาคำตอบของ Delayed Pattern Generation Technique ซึ่งจะสร้างรูปแบบการตัดขึ้นทีละหนึ่งรูปแบบจนกระทั่งได้คำตอบที่ดีที่สุด จำนวนทั้งหมดของรูปแบบการตัดที่บันทึกจึงไม่แน่นอนขึ้นกับโจทย์ปัญหาและผลของกระบวนหาคำตอบนั้น แต่อย่างไรก็ตามมีการกำหนดพื้นที่ไว้จำกัดจำนวนหนึ่ง ในแต่ละรูปแบบการตัด P_j จะประกอบด้วยกลุ่มเซลหนึ่งคอลัมน์ที่แต่ละเซลบันทึกค่า A_{ij} ไว้ และยังมีกลุ่มเซลในแนวนอนหนึ่งแถวที่คำนวณค่าเศษการตัดของรูปแบบการตัดแต่ละอัน (T_j) ไว้ด้วย

		Cutting times																													
	Xj	0	1	0	0	0	12	0	3	15	0	2	0	0	0	2	5	0	0	4	0	0	13	0	0	1	2	12	1	0	3
		Efficient cutting patterns																													
	Tj	0.06	0.11	0.08	0.19	0.06	0.02	0.19	0.00	0.10	0.17	0.10	0.14	0.20	0.07	0.08	0.18	0.19	0.06	0.06	0.03	0.08	0.10	0.12	0.07	0.01	0.12	0.07	0.05	0.08	0.14
i	Pj = [Aij]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1		2	1	3			1	2		2	1				1			1	2		5				1		1	1	2	1	
2		1				1			2				1	1	1					2				2							
3			1			1							1					2	5								1				1
4					3						1			1								1	1			1					
5				8											1	1														4	1
6			1				1						2													2					
7			1									2					2					1									
8											3			1																	
9						1																			3						
10								1												1				2			1				
11									2											1									1		
12			1										1														1	1			
13								1									1									1				1	
14						1						1		1					1									1	1		
15					1																	1									
16							1								1			1													1
17		1														1					1		1								
18										1																					

รูปที่ 4.3 เซตของรูปแบบการตัดและคำตอบที่ดีที่สุด

ส่วนจำนวนครั้งของการตัดซ้ำ (X_j) ของคำตอบที่ดีที่สุด เมื่อกระบวนการหาคำตอบเสร็จสิ้นแล้ว จะถูกบันทึกอยู่ในกลุ่มเซลในแนวนอนหนึ่งแถว เพื่อใช้แสดงค่าคำตอบนี้ นอกจากนี้ในบางรูปแบบการตัดที่มีจำนวนครั้งการตัดซ้ำเท่ากับศูนย์จะหมายถึงว่า รูปแบบการตัดนั้นไม่ได้ถูกนำไปใช้ในแผนการตัดคำตอบที่ดีที่สุดนั่นเอง

4.4.3 การคำนวณค่าที่เกี่ยวข้องกับแผนการตัด

ส่วนการคำนวณค่าที่เกี่ยวข้องกับแผนการตัดคือพื้นที่สำหรับการคำนวณค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนการสร้างเซตของรูปแบบการตัด และขั้นตอนการคำนวณหาปริมาณเศษการตัดรวมของคำตอบที่ดีที่สุด ได้แก่ $Sum(A_{ij})$, $D_i/Sum(A_{ij})$, S_i, US_i, OS_i, และ $Li{\cdot}OSi$

Si	USi	OSi	Li·OSi	Sum(Aij)	Di/Sum(Aij)
74	0	59	14.16	74	0.20
16	0	1	0.69	35	0.43
15	0	0	0.00	28	0.54
15	0	0	0.00	27	0.56
16	0	1	1.15	28	0.54
15	0	0	0.00	15	1.00
15	0	0	0.00	16	0.94
15	0	0	0.00	13	1.15
15	0	0	0.00	13	1.15
15	0	0	0.00	11	1.36
15	0	0	0.00	12	1.25
15	0	0	0.00	9	1.67
15	0	0	0.00	6	2.50
15	0	0	0.00	6	2.50
15	0	0	0.00	7	2.14
15	0	0	0.00	5	3.00
15	0	0	0.00	3	5.00
15	0	0	0.00	1	15.00

รูปที่ 4.4 การคำนวณค่าที่เกี่ยวข้องกับแผนการตัด

ค่า $Sum(A_{ij})$ และค่า $D_i/Sum(A_{ij})$ ซึ่งก็คือค่าดัชนี V_i ที่ใช้สำหรับการสร้างวงล้อแห่งการสุ่มแบบถ่วงน้ำหนักในขั้นตอนของการสร้างเซตเริ่มต้นของรูปแบบการตัด ซึ่งจะเป็นการคำนวณค่า $Sum(A_{ij})$ และค่า $D_i/Sum(A_{ij})$ และปรับปรุงให้เป็นปัจจุบันเสมอในแต่ละรอบที่ได้สร้างรูปแบบการตัดอันใหม่เพิ่มเข้ามาในเซต

เมื่อได้ทำการหาแผนการตัดคำตอบที่ดีที่สุดเสร็จสิ้นแล้ว ค่าที่เกี่ยวข้องกับแผนนี้ เช่น จำนวนท่อนของแต่ละขนาดความยาวที่ตัดได้ตามแผนการตัด หรือ Supplies (S_i), จำนวนท่อนของแต่ละขนาดความยาวที่ตัดขาดไปจากความต้องการ หรือ Undersupplies (US_i) ซึ่งจะมีค่าเมื่อค่า $D_i > S_i$, จำนวนท่อนของแต่ละขนาดความยาวที่ตัดที่เกินไปจากความต้องการ หรือ Oversupplies (OS_i) ซึ่งจะมีค่าเมื่อค่า $D_i < S_i$, และปริมาณความยาวของท่อนที่ตัดเกินความต้องการซึ่งคำนวณได้จากผลคูณของ $L_i{\cdot}OS_i$ ค่าต่าง ๆ เหล่านี้สุดท้ายแล้วจะถูกนำไปใช้คำนวณปริมาณเศษจากการตัดตามแผนการตัดคำตอบนั่นเอง เนื่องจากแบบจำลองของปัญหาได้ถูกกำหนดเงื่อนไข constraints ให้ต้องตอบสนองต่อรายการความต้องการครบถ้วนทั้งหมด คำตอบแผนการตัดใด ๆ ที่ได้จึงต้องไม่เกิดกรณีที่มี Undersupplies (US_i)

4.4.4 การคำนวณประเมินแผนการตัดคำตอบ

นอกจากแผนการตัดคำตอบที่ดีที่สุดจะประกอบด้วย เซตของรูปแบบการตัดที่ประสิทธิภาพดีที่นำมาใช้ และจำนวนครั้งการตัดซ้ำของแต่ละรูปแบบแล้ว ยังมีค่าต่างที่ใช้สำหรับการประเมินผลแผนการตัดนี้ ได้แก่ จำนวนรูปแบบการตัดที่แตกต่างกันที่ใช้ (*nDiffPat*), ผลรวมของจำนวนเส้นวัสดุคงคลังที่ใช้ทั้งหมด (*Sum*(X_j)), ผลรวมของเศษการตัดจากรูปแบบการตัด (*Sum*(T_j)), ผลรวมของเศษจากปริมาณความยาวของท่อนที่ตัดเกินความต้องการ (*Sum*($L_i \cdot OS_i$)), ปริมาณเศษการตัดทั้งหมด (*Total Waste*), ร้อยละของปริมาณเศษการตัด (*%waste*), ผลรวมของจำนวนวัสดุคงคลังที่ถูกตัดตามรูปแบบแล้วมีเศษการตัดมากกว่าศูนย์ (*Sum*(W_j)), และผลรวมของขนาดท่อนความยาวที่ยังตัดได้ไม่ครบจำนวน (*Sum*(O_j))

Result Evaluation	
nDiffPat	21
Sum(Xj)	108
Sum(Tj)	11.45
Sum(Li·OSi)	16.00
Total Waste	27.45
%waste	2.61
Sum(Wj)	108
Sum(Oj)	730

รูปที่ 4.5 การคำนวณประเมินแผนการตัดคำตอบ

ค่า *nDiffPat* นั้นช่วยชี้ให้เห็นถึงคุณภาพของแผนการตัดคำตอบ ซึ่งหากมีค่ามากหมายความว่าต้องใช้รูปแบบการตัดจำนวนมากและทำให้ต้องปรับเปลี่ยนระยะใบมีดบ่อยครั้งและทำให้ใช้ระยะเวลาทำงานตัดมากกว่า และยังแสดงถึงว่าแต่ละรูปแบบการตัดถูกนำไปใช้ตัดซ้ำน้อยครั้งกว่า ดังนั้นแผนการตัดคำตอบที่มีคุณภาพดีควรมีค่า *nDiffPat* น้อยที่สุด แม้จะไม่ใช่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยตรง

ค่า *Sum*(X_j) คือตัวแปรที่ใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยการ Minimization ดังนั้นค่านี้จะควรเป็นค่าที่น้อยที่สุดที่หาได้จากแผนการตัดที่เป็นไปได้ทั้งหมด อย่างไรก็ตามจากความเสมือนกันของรูปแบบการตัดจึงอาจทำให้มีแผนการตัดที่ดีที่สุดจำนวนมาก ที่ให้ค่า *Sum*(X_j) ที่น้อยที่สุดเท่ากัน

ค่า *Sum*(T_j) และค่า *Sum*($L_i \cdot OS_i$) เป็นผลรวมของเศษการตัดที่คำนวณจากส่วนที่ 1 และ 2 ซึ่งหากนำมารวมกันจะได้ค่าเท่ากับ *Total Waste* และหากนำ *Total Waste* มาเทียบหาร้อยละกับปริมาณความยาวที่ต้องการรวมทั้งหมดจะได้ค่าเท่ากับ *%waste* ค่าเหล่านี้เป็นตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณปริมาณเศษการตัดจากแผนการตัดคำตอบ ซึ่งรายละเอียดของสมการที่ใช้คำนวณค่าได้อธิบายไว้ในหัวข้อเฉพาะก่อนหน้านี้

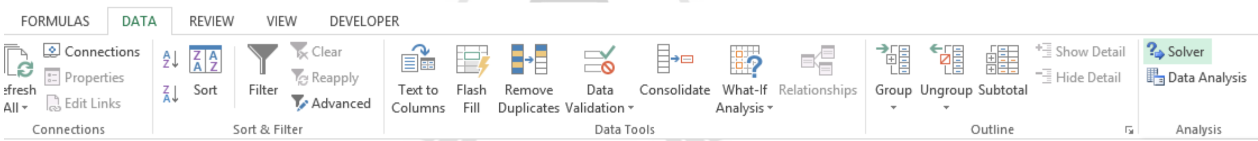
ค่า *Sum*(W_j) คือ ผลรวมของจำนวนวัสดุคงคลังที่ถูกตัดตามรูปแบบแล้วมีเศษการตัดมากกว่าศูนย์ ซึ่งในแผนการตัดหนึ่ง ๆ ที่เป็นคำตอบที่ได้ จะมีการใช้จำนวนวัสดุคงคลังความยาวมาตรฐานไป

เป็นจำนวนทั้งสิ้น *Sum*(X_j) เส้น แต่หากพิจารณาในรายละเอียดจะพบว่าบางรูปแบบการตัดนั้นอาจนำไปตัดได้พอดีครบทั้งเส้นจนไม่เหลือเศษเลย ซึ่งเป็นสิ่งที่ดี แต่หากรูปแบบการตัดที่เหลือนั้นจะก่อให้เกิดเศษการตัดประจำรูปแบบการตัดนั้น ซึ่งค่า *Sum*(W_j) จะเป็นตัวแปรที่แสดงว่าแผนการตัดนั้นมีวัสดุคงคลังจำนวนกี่เส้นที่ตัดแล้วมีเศษเกิดขึ้น

ค่า *Sum*(O_j) ก็คือ ผลรวมจำนวนขนาดความยาวที่ต้องการที่ยังตัดไม่เสร็จ (ω) หรือผลรวมของ open orders คือตัวแปรที่ใช้ในการตรวจวัดความไม่ต่อเนื่องในการตัดซึ่งเป็นผลมาจากลำดับของการตัดตามรูปแบบ ซึ่งเป็นตัวแปรหลักที่ใช้ในการประเมินคำตอบของปัญหาความต่อเนื่อง (Contiguity) นั่นเอง

4.5 เครื่องมือช่วยหาคำตอบด้วยวิธี Simplex

แบบจำลองปัญหาที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม Microsoft Excel 2013 นี้ได้เลือกใช้วิธีการหาคำตอบของโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) เป็น Simplex Method ซึ่งมีโปรแกรมสำเร็จรูปคือ Solver™ ของบริษัท Frontline Systems, Inc. ซึ่งเป็นโปรแกรม Add-in ที่มีอยู่แล้วใน Excel ซึ่งหลังจากติดตั้งโปรแกรมแล้วจะปรากฏในเมนู Ribbon ของ Excel เพื่อรอการเรียกใช้ต่อไป ดังแสดงในรูปข้างล่าง



รูปที่ 4.6 Solver icon ใน DATA tab บนเมนู Ribbon

ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม Solver คือเริ่มจากการกำหนดส่วนประกอบหลักของแบบจำลองซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ตัวแปรตัดสินใจ และฟังก์ชันข้อจำกัด หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองทั้ง 3 ส่วนนี้แสดงดังในรูปข้างล่าง

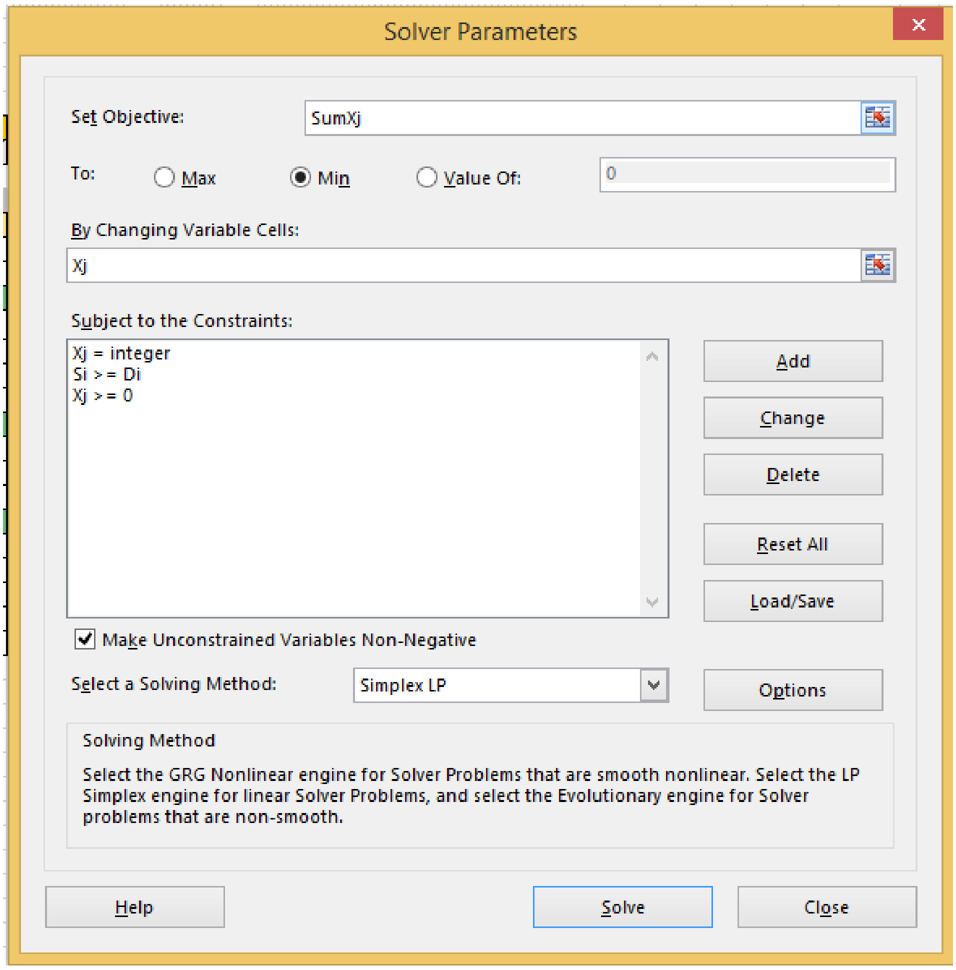
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สามารถกำหนดได้ว่าเป็น Optimization แบบการ Minimization หรือ Maximization และโดยการกำหนดเซลหรือชื่อเซล (Named Range) ที่ใช้คำนวณค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในกรณีนี้กำหนดให้เป็น Minimization (Min) และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ *SumXj*

ตัวแปรตัดสินใจกำหนดด้วยกลุ่มเซลที่เรียกว่า Changing Variable Cells ซึ่งโปรแกรม Solver จะบังคับให้กำหนดกลุ่มเซลหรือชื่อกลุ่มเซล (Named Range) ที่ปรากฏอยู่ในแผ่นงาน (Sheet) ในกรณีนี้กำหนดให้เป็น *Xj*

ฟังก์ชันข้อจำกัดสามารถป้อนข้อมูลแบ่งเป็นชุด ๆ ตามแต่ละฟังก์ชันที่ต้องการได้ โดยอ้างอิงไปที่กลุ่มเซลที่มีสูตรฟังก์ชันข้อจำกัดที่ต้องการ จากนั้นกำหนดเครื่องหมายสมการหรืออสมการที่

เหมาะสม และกำหนดค่าคงที่หรือข้อมูลทางด้านขวาของอสมการ (หรือสมการ) ทั้งนี้ชนิดของฟังก์ชันข้อจำกัดจะเป็นแบบ Hard constraints คือจำเป็นต้องได้ค่าที่สอดคล้องทั้งหมดทุกฟังก์ชันข้อจำกัด ในกรณีนี้กำหนดใช้ฟังก์ชันข้อจำกัดจำนวน 3 ฟังก์ชัน ได้แก่ $X_j = \text{integer}$, $S_i \geq D_i$, และ $X_j \geq 0$ นอกจากนี้ยังกำหนดให้ใช้ทางเลือก ค่าตัวแปรเป็นจำนวนบวก หรือ Make Unconstrained Variables Non-Negative

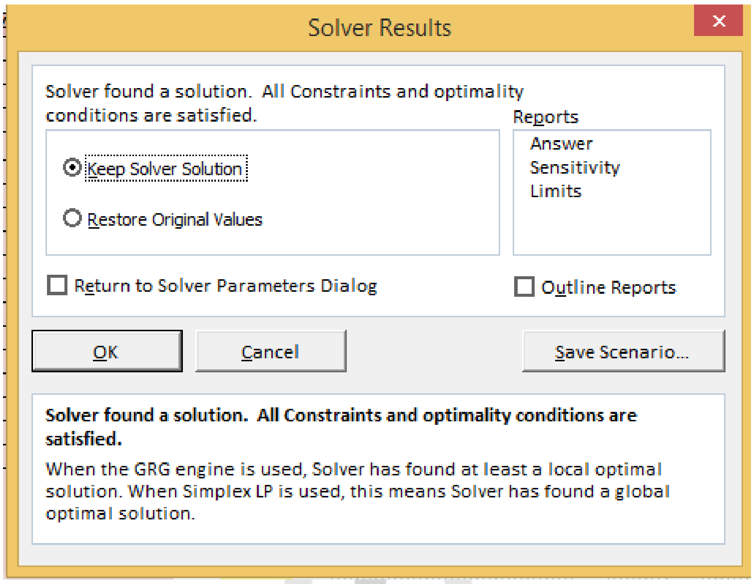
วิธีการหาคำตอบของแบบจำลอง Linear Programming ถูกกำหนดให้ใช้วิธี Simplex Method เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ค่าตอบที่ดีที่สุดได้อย่างแน่นอน (หรือหาคำตอบไม่ได้)



รูปที่ 4.7 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลส่วนประกอบหลักของแบบจำลอง

หลังจากที่ได้กำหนดส่วนประกอบหลักของแบบจำลองเสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการหาคำตอบด้วยการสั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณค่า หรือ Solve ซึ่งโดยทั่วไป วิธี Simplex Method จะใช้เวลาในการหาคำตอบไม่นาน แต่หากกำหนดข้อจำกัดเป็นคำตอบตัวเลขจำนวนเต็ม อาจทำให้การหาคำตอบทำได้ยากลำบากและใช้เวลานานขึ้น และ/หรือหาคำตอบไม่ได้เลย เมื่อกระบวนการหาคำตอบสิ้นสุดลง โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปข้างล่างเพื่อแสดงข้อสรุปจากการหาคำตอบ รวมทั้งให้ผู้ใช้เลือกที่จะบันทึกค่าคำตอบที่ได้ในครั้งนี้ หรือไม่บันทึกและกลับไปใช้ค่าข้อมูลเริ่มต้น นอกจากนี้ใน

หน้าต่างเดียวกันยังมีตัวเลือกให้สร้างรายงานประเภทต่าง ๆ ของผลคำตอบได้อีกด้วย โดยเฉพาะรายงานการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Reports > Sensitivity) โดยที่การวิเคราะห์ความอ่อนไหวนี้จะเป็นเครื่องมือช่วยในการคำนวณค่าราคาเงา (Shadow Prices) ของฟังก์ชันข้อจำกัดแต่ละฟังก์ชัน ซึ่งจะนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไปคือขั้นตอนการสร้างรูปแบบการตัดอันใหม่ที่ถูกเพิ่มเข้าไปในเซต

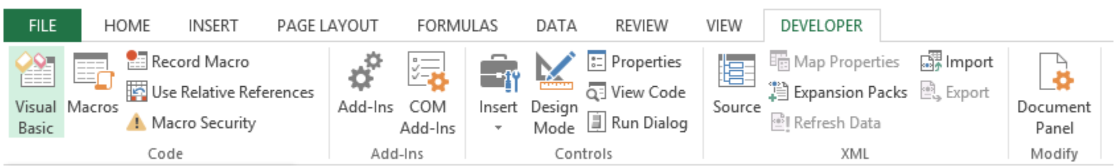


รูปที่ 4.8 หน้าต่างแสดงการเสร็จสิ้นของกระบวนการหาคำตอบ

4.6 เครื่องมือช่วยสร้างชุดคำสั่งอัตโนมัติ

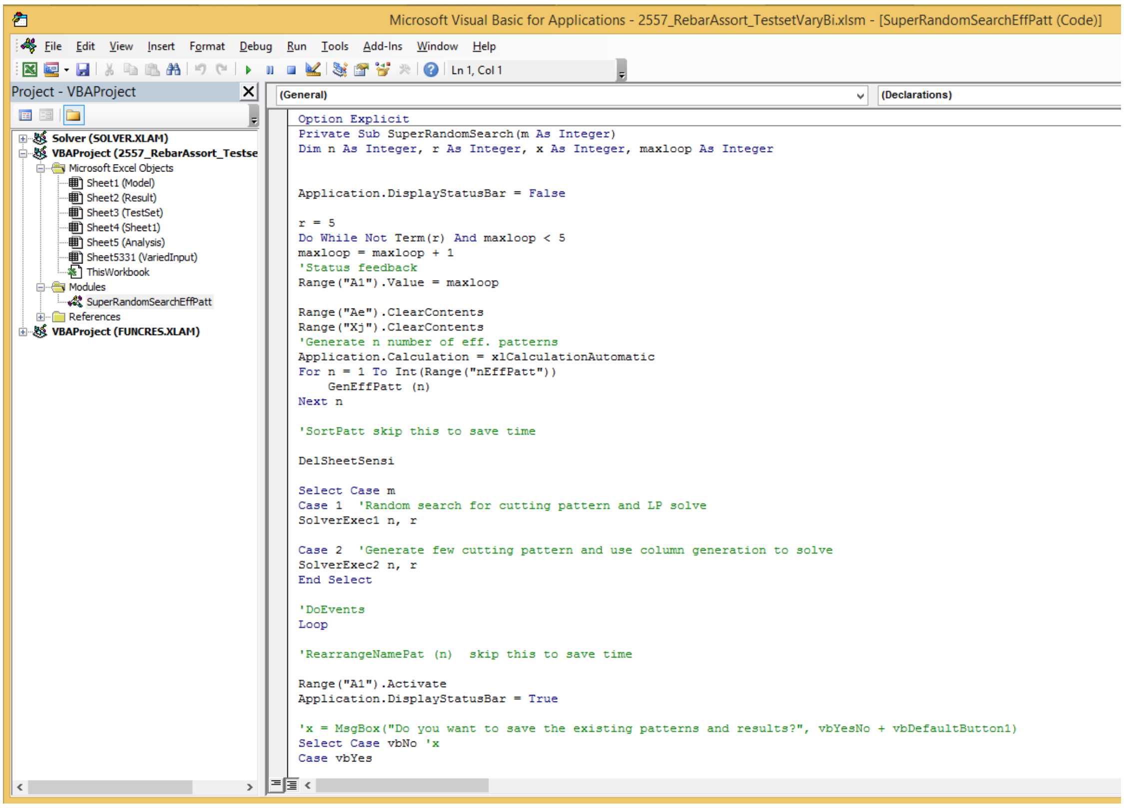
นอกจากโปรแกรม Excel จะมีเครื่องมือช่วยมากมายในการสร้างแบบจำลองของปัญหาและหาคำตอบที่ดีที่สุดแล้ว ยังมีเครื่องมือช่วยสร้างชุดคำสั่งอัตโนมัติ (Macros) ที่ใช้ภาษา VBA ในการพัฒนา ซึ่งในการวิจัยนี้จำเป็นต้องพัฒนาโปรแกรมเพิ่มเหล่านี้ขึ้นเองเพื่อใช้งาน Intensive Search Algorithm สำหรับการสร้างรูปแบบการตัดที่ประสิทธิภาพดี ใช้ในการคำนวณตามขั้นตอนของ Delayed Pattern Generation Technique ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณหลายขั้นและซับซ้อน และยังเกี่ยวพันกับการเรียกใช้งานโปรแกรม Solver ซ้ำ ๆ หลายครั้ง ซึ่งเครื่องมือ VBA Editor นี้มีความสำคัญที่ทำให้การหาคำตอบเป็นไปอย่างต่อเนื่องอัตโนมัติและราบรื่น นอกจากนี้ยังช่วยควบคุมการทดสอบโจทย์ปัญหาตัวอย่างที่ทำการทดสอบจำนวนมากและแบ่งเป็นหลากหลายกรณี ให้เกิดขึ้นอย่างเป็นลำดับอย่างต่อเนื่องและอัตโนมัติ พร้อมทั้งยังสั่งให้บันทึกผลคำตอบที่ได้ในแต่ละครั้งเพื่อจัดเก็บไว้อย่างเป็นระเบียบได้อีกด้วย

การเรียกใช้ VBA Editor จะปรากฏไอคอนของ Visual Basic ในเมนู Ribbon ของ Excel ดังแสดงในรูปข้างล่าง



รูปที่ 4.9 Visual Basic icon ใน DEVELOPER tab บนเมนู Ribbon

เมื่อเรียกใช้งานจะปรากฏหน้าต่างของ VBA Editor ดังแสดงในรูปข้างล่าง นอกจากนี้การสร้างชุดคำสั่งอัตโนมัติยังจำเป็นอย่างยิ่งในการทดสอบแบบจำลองของปัญหาทั้งประเด็นลักษณะคละของรายการความต้องการและประเด็นความต่อเนื่องของการตัด ที่ต้องทำการสั่งให้ปรับเปลี่ยนค่าข้อมูลต่าง ๆ ของโจทย์ปัญหาแล้วทำการหาคำตอบ วนรอบซ้ำเช่นนี้เป็นจำนวนมาก และยังใช้ในการสั่งให้บันทึกผลคำตอบที่ได้ในแต่ละครั้ง ซึ่งจะมีข้อมูลจำนวนมากมายที่ต้องบันทึกไว้ให้เป็นระบบระเบียบเพื่อการวิเคราะห์ผลที่ได้ต่อไป



รูปที่ 4.10 หน้าต่าง Visual Basic for Application (VBA) Editor

4.7 โจทย์ปัญหาตัวอย่าง

เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ความอ่อนไหว จะทำการปรับเปลี่ยนค่าข้อมูลนำเข้าต่าง ๆ ที่เป็นโจทย์ปัญหาไปตามช่วงของตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการทดสอบ ดังนั้นโจทย์ปัญหาตัวอย่างที่กล่าวถึงในหัวข้อนี้หมายถึงโจทย์ปัญหาตัวอย่างเริ่มต้นหรือโจทย์ปัญหาฐาน (base problem) ที่สร้างขึ้นโดยการอ้างอิงกับปัญหาจริงที่พบได้ในโครงการก่อสร้าง และจะใช้ค่าคำตอบที่ได้จากโจทย์ปัญหาฐานนี้เป็นตัวควบคุม (controlled sample) ในการอ้างอิงเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหว รายละเอียดของโจทย์ปัญหาฐานมีดังนี้ กำหนดให้มีขนาดความยาวที่ต้องการที่แตกต่าง

กันจำนวน 18 ขนาด (m = 18) ซึ่งถูกแบ่งออกเป็นช่วงความยาวต่าง ๆ ที่ต่อเนื่องกัน 6 ช่วง แต่ละช่วงประกอบด้วย 3 ขนาดความยาว แบ่งช่วงเหล่านี้ด้วยอัตราส่วนของขนาดท่อนความยาวที่ต้องการต่อความยาวของวัสดุคงคลัง (L_i/LS) กำหนดให้ LS = 10.00 เมตร มีช่วงต่าง ๆ สำหรับอัตราส่วน ดังนี้

กลุ่มที่ 1 มีอัตราส่วนของขนาดท่อนความยาวที่ต้องการต่อความยาวของวัสดุคงคลัง (L_i/LS) ในช่วง (0.020, 0.100] หรือจัดได้ว่าเป็นขนาดท่อนความยาวที่เป็นท่อนสั้นอย่างมาก (Tiny)

กลุ่มที่ 2 มีอัตราส่วนของขนาดท่อนความยาวที่ต้องการต่อความยาวของวัสดุคงคลัง (L_i/LS) ในช่วง (0.100, 0.200] หรือจัดได้ว่าเป็นขนาดท่อนความยาวที่เป็นท่อนสั้นมาก (Very short)

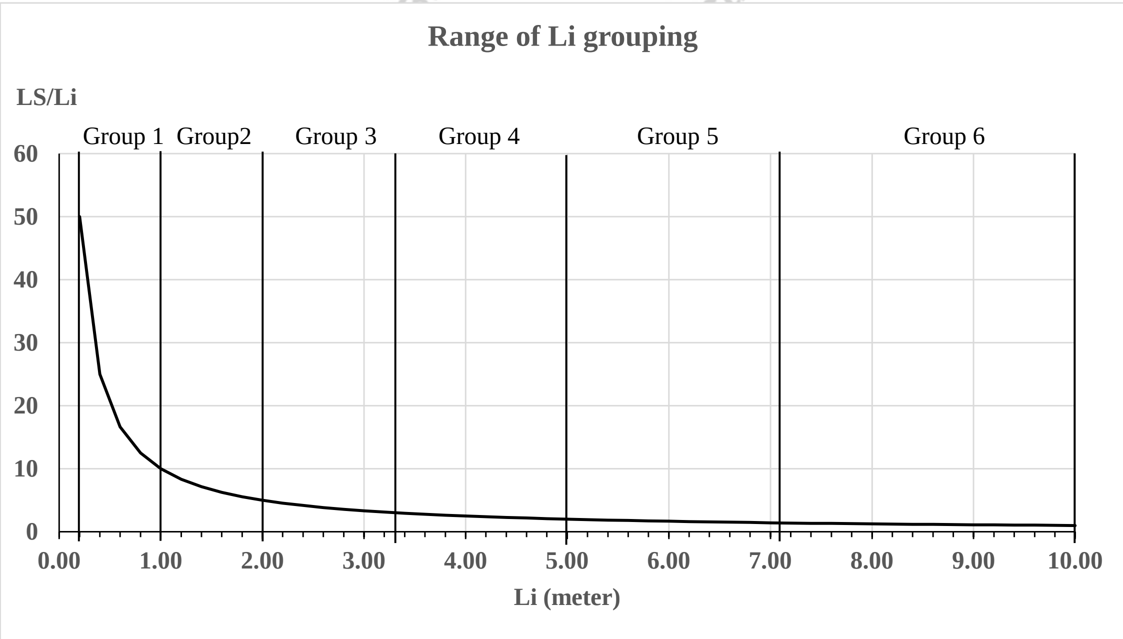
กลุ่มที่ 3 มีอัตราส่วนของขนาดท่อนความยาวที่ต้องการต่อความยาวของวัสดุคงคลัง (L_i/LS) ในช่วง (0.200, 0.333] หรือจัดได้ว่าเป็นขนาดท่อนความยาวที่เป็นท่อนสั้น (Short)

กลุ่มที่ 4 มีอัตราส่วนของขนาดท่อนความยาวที่ต้องการต่อความยาวของวัสดุคงคลัง (L_i/LS) ในช่วง (0.333, 0.500] หรือจัดได้ว่าเป็นขนาดท่อนความยาวที่ยาวปานกลาง (Intermediate)

กลุ่มที่ 5 มีอัตราส่วนของขนาดท่อนความยาวที่ต้องการต่อความยาวของวัสดุคงคลัง (L_i/LS) ในช่วง (0.500, 0.714] หรือจัดได้ว่าเป็นขนาดท่อนความยาวที่เป็นท่อนยาว (Long) และ

กลุ่มที่ 6 มีอัตราส่วนของขนาดท่อนความยาวที่ต้องการต่อความยาวของวัสดุคงคลัง (L_i/LS) ในช่วง (0.714, 1.000) หรือจัดได้ว่าเป็นขนาดท่อนความยาวที่เป็นท่อนยาวมาก (Very long)

ทั้งนี้นโยบายที่กำหนดแบ่งช่วงของขนาดความยาวที่ต้องการนี้ก็เพื่อเป็นการรักษาความหลากหลายของขนาดความยาวที่ต้องการของโจทย์ปัญหา ให้กระจายครอบคลุมทุกช่วงขนาดความยาว รูปกราฟข้างล่างแสดงอัตราส่วน (LS/L_i) ที่สัมพันธ์กับการแบ่งช่วงกลุ่มขนาดความยาวที่ต้องการ



รูปที่ 4.11 การกำหนดแบ่งกลุ่มช่วงของความยาว L_i

นอกจากนี้โจทย์ปัญหาฐานจะถูกกำหนดให้มีการกระจายของจำนวนความต้องการอย่างสม่ำเสมอ (uniform distribution of the demands) เท่ากันเท่ากับ 15 ท่อนสำหรับแต่ละขนาดความยาว ดังนั้นจำนวนท่อนที่ต้องการจึงมีทั้งหมด 270 ท่อน ดังแสดงข้อมูลในตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลของโจทย์ปัญหาฐาน

	Group 1 (Tiny)			Group 2 (Very short)			Group 3 (Short)			Group 4 (Intermediate)			Group 5 (Long)			Group 6 (Very long)		
_Li/LS_ range	(0.020, 0.100]			(0.100, 0.200]			(0.200, 0.333]			(0.333, 0.500]			(0.500, 0.714]			(0.714, 1.000)		
_i_ (1,2,…, _m_)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
_Li_ (m.)	0.24	0.69	0.86	1.13	1.15	1.89	2.37	2.82	3.23	4.25	4.31	4.53	5.08	5.16	6.42	7.85	8.77	9.42
_Di_ (pc.)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Sum_Di_			45			45			45			45			45			45

เมื่อทำการหาคำตอบที่ดีที่สุดของโจทย์ด้วยขั้นตอนที่อธิบายในหัวข้อต่างๆข้างต้น จะได้แผนการตัดคำตอบที่ให้ค่าร้อยละของปริมาณเศษการตัดเท่ากับ 2.61% ใช้จำนวนวัสดุคงคลังไปทั้งหมด 108 เส้น (*%waste* = 2.61%, $\sum_j X_j$ = 108) เนื่องจากค่า *%waste* ของคำตอบที่ดีที่สุดจะเป็นค่าที่เฉพาะตัวสำหรับโจทย์ปัญหาชุดนั้น (มีค่าเท่าเดิมเสมอสำหรับโจทย์ปัญหาชุดหนึ่ง) ดังนั้นค่านี้จะถูกนำมาใช้เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากโจทย์ปัญหาชุดอื่น ๆ ที่สร้างขึ้นจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหว เพื่อหาข้อสรุปที่ได้

4.8 แบบแผนการทดสอบชุดที่ 1

การทดสอบถูกออกแบบให้กำหนดปรับเปลี่ยนค่าจำนวนความต้องการของแต่ละขนาดความยาว (D_i) อย่างเป็นระบบ ซึ่งขนาดความยาวที่ต้องการเหล่านี้ยังถูกจัดแบ่งเป็นกลุ่ม ๆ ด้วย ทั้งนี้เพื่อให้เห็นผลกระทบของการกระจายของ D_i ระหว่างกลุ่มของช่วงขนาดความยาวต่าง ๆ ต่อร้อยละของเศษการตัดที่เกิดขึ้น ชุดการทดสอบมีจำนวนทั้งหมด 37 ชุด แต่ละชุดจะถูกทดสอบซ้ำ ๆ เป็นจำนวน 100 ครั้ง เพื่อให้มีข้อมูลผลการทดสอบจำนวนมากเพียงพอต่อการวิเคราะห์ทางสถิติและสร้างบทสรุปทั่วไปได้ รายละเอียดของชุดการทดสอบทั้งหมดได้แสดงไว้ในตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลการปรับเปลี่ยนค่า D_i ของโจทย์ปัญหาของชุดทดสอบทั้ง 37 ชุด

		Test Data					
		The total number of randomly varying *Di* of the group					
		Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5	Group 6
	Base (uniform)	15; 15; 15	15; 15; 15	15; 15; 15	15; 15; 15	15; 15; 15	15; 15; 15
Change on each group at a time	Test 1	45					
	Test 2		45				
	Test 3			45			
	Test 4				45		
	Test 5					45	
	Test 6						45
	Test 7	among 2 groups of 90					
	Test 8			among 2 groups of 90			
	Test 9					among 2 groups of 90	
	Test 10		Vary among all 6 groups with total of 270				
	Test 11		Vary among all 6 groups with total of 270				
Simultaneous change of all 6 groups	Test 12	45	45	45	45	45	45
	Test 13	45	45	45	45	45	45
	Test 14	90	36	36	36	36	36
	Test 15	36	90	36	36	36	36
	Test 16	36	36	90	36	36	36
	Test 17	36	36	36	90	36	36
	Test 18	36	36	36	36	90	36
	Test 19	36	36	36	36	36	90
	Test 20	120	30	30	30	30	30
	Test 21	30	120	30	30	30	30
	Test 22	30	30	120	30	30	30
	Test 23	30	30	30	120	30	30
	Test 24	30	30	30	30	120	30
	Test 25	30	30	30	30	30	120
	Test 26	150	24	24	24	24	24
	Test 27	24	150	24	24	24	24
	Test 28	24	24	150	24	24	24
	Test 29	24	24	24	150	24	24
	Test 30	24	24	24	24	150	24
	Test 31	24	24	24	24	24	150
	Test 32	180	18	18	18	18	18
	Test 33	18	180	18	18	18	18

Test 34	**18**	**18**	**180**	**18**	**18**	**18**
Test 35	**18**	**18**	**18**	**180**	**18**	**18**
Test 36	**18**	**18**	**18**	**18**	**180**	**18**
Test 37	**18**	**18**	**18**	**18**	**18**	**180**

สำหรับชุดทดสอบที่ 1 ถึง 6 จำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i) ของแต่ละกลุ่มช่วงขนาดความยาวถูกกำหนดให้เปลี่ยนแปลงอย่างสุ่มไปในแต่ละครั้งของการทดสอบ จากกลุ่มช่วงขนาดที่ 1 ไปจนถึง 6 ทีละชุดทดสอบตามลำดับ โดยกำหนดให้ผลรวมของ D_i ของกลุ่มคงที่เสมอเท่ากับ 45 ท่อน การปรับเปลี่ยนค่า D_i อย่างสุ่มนี้จะทำทีละกลุ่มช่วงสำหรับแต่ละชุดทดสอบ โดยที่กลุ่มช่วงที่เหลือที่ไม่ได้ถูกปรับเปลี่ยนก็จะใช้ค่าเริ่มต้นของโจทย์ปัญหาฐานที่ D_i เท่ากับ 15 ท่อน ชุดทดสอบที่ 1 ถึง 6 นี้มีเป้าประสงค์เพื่อหาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความต้องการแบบจำกัดวงแคบ (local demand variation) ไว้ที่เพียงหนึ่งกลุ่มช่วงความยาว

สำหรับชุดทดสอบที่ 7 ถึง 9 แต่ละชุดจะรวมกลุ่มช่วงขนาดความยาวไว้ 2 กลุ่มที่ติดกันและทำการปรับเปลี่ยนค่า D_i อย่างสุ่มไปเฉพาะภายใน 2 กลุ่มนั้นในแต่ละครั้งของการทดสอบ โดยกลุ่มช่วงที่ 1 รวมกับ 2, กลุ่มช่วงที่ 3 รวมกับ 4, และ กลุ่มช่วงที่ 5 รวมกับ 6 ตามลำดับ และกำหนดให้ผลรวมของ D_i ของทั้ง 2 กลุ่มคงที่เสมอเท่ากับ 90 ท่อน การปรับเปลี่ยนค่า D_i อย่างสุ่มนี้จะทำทีละ 2 กลุ่มช่วงสำหรับแต่ละชุดทดสอบ โดยที่กลุ่มช่วงที่เหลือที่ไม่ได้ถูกปรับเปลี่ยนก็จะใช้ค่าเริ่มต้นของโจทย์ปัญหาฐานที่ D_i เท่ากับ 15 ท่อน ชุดทดสอบที่ 7 ถึง 9 นี้มีเป้าประสงค์เพื่อหาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความต้องการในวงที่ขยายกว้างขึ้น

สำหรับชุดทดสอบที่ 10 กับ 11 แต่ละชุดจะรวมกลุ่มช่วงทั้งหมด 6 ช่วงขนาดเข้าด้วยกัน และทำการปรับเปลี่ยนค่า D_i อย่างสุ่มไปพร้อมกันทั้งหมด โดยกำหนดให้ผลรวมของ D_i ทั้งหมดคงที่เสมอเท่ากับ 270 ท่อน ชุดทดสอบที่ 10 กับ 11 จึงมีการตั้งค่าที่เหมือนกัน โดยเป้าประสงค์ก็เพื่อหาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความต้องการในวงที่ขยายกว้างจนครอบคลุมตลอดทุกช่วงขนาดความยาว

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของชุดทดสอบที่ 1 ถึง 9 ก็คือถูกกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงคราวละตำแหน่งไม่พร้อมกัน (separate change) กลุ่มที่เหลือที่ไม่ได้ถูกเปลี่ยนแปลงจะใช้ค่า D_i เริ่มต้นเดิมที่เท่ากับ 15 ท่อน แต่สำหรับชุดทดสอบที่ 12 ถึง 37 หรือชุดทดสอบจากนี้ไปจะใช้นโยบายการเปลี่ยนแปลงพร้อมกัน (simultaneous change) ทั้งหมดทุกกลุ่มช่วงความยาวทั้ง 6 กลุ่ม โดยที่การกระจายของจำนวนความต้องการ (D_i) ระหว่างกลุ่มช่วงต่าง ๆ จะถูกควบคุมไว้ให้ต่างกันแล้วแต่กรณีดังนี้

สำหรับชุดทดสอบที่ 12 และ 13 จำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i) ของแต่ละกลุ่มช่วงขนาดความยาวถูกกำหนดให้เปลี่ยนแปลงอย่างสุ่มไปในแต่ละครั้งของการทดสอบ พร้อมกันทั้ง 6 กลุ่ม โดยที่ผลรวม

ของจำนวนท่อนของแต่ละกลุ่มถูกกำหนดให้เท่ากับ 45 ท่อน และชุดทดสอบที่ 12 และ 13 จะมีการตั้งค่าทุกอย่างที่เหมือนกัน เป้าประสงค์ของชุดทดสอบทั้งสองนี้ก็เพื่อหาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความต้องการในลักษณะที่เกิดขึ้นพร้อมกันทั้งหมด แต่การกระจายของจำนวนความต้องการยังคงเป็นแบบสม่ำเสมอเท่ากันในแต่ละกลุ่มช่วง

ชุดทดสอบที่ 14 ถึง 19 แต่ละชุดจะใช้การกระจายของผลรวม D_i แบบไม่เท่ากันระหว่างกลุ่มช่วง กล่าวคือในชุดทดสอบที่ 14 จะใช้สัดส่วนของค่าผลรวม D_i ของแต่ละกลุ่มช่วงทั้ง 6 กลุ่มเป็น 90:36:36:36:36:36 ท่อน ทั้งนี้ผลรวมจำนวน D_i ทั้งหมดยังคงเท่ากับชุดทดสอบอื่น ๆ คือ 270 ท่อน จำนวน D_i ถูกปรับเปลี่ยนอย่างสุ่มไปในการทดสอบแต่ละครั้ง และพร้อมกันทั้งหมด โดยที่สัดส่วนของค่าผลรวมของ D_i จะเปลี่ยนจากค่ามากที่สุดคือ 90 ที่กลุ่มช่วงที่ 1 ไปสู่กลุ่มช่วงที่ 2, 3, 4, 5, และ 6 สำหรับชุดทดสอบที่ 14 ถึง 19 ตามลำดับ ทั้งนี้ชุดทดสอบเหล่านี้มีเป้าประสงค์เพื่อหาผลกระทบของความไม่สมดุลของจำนวนที่ต้องการระหว่างกลุ่มช่วงขนาดต่างๆ

สำหรับชุดทดสอบที่ 20 ถึง 25, ที่ 26 ถึง 31, และที่ 32 ถึง 37 จะให้กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนค่าที่คล้ายคลึงกันกับในคราวก่อนหน้า กล่าวคือจะกำหนดใช้สัดส่วนของค่าผลรวมของ D_i ของแต่ละกลุ่มช่วงทั้ง 6 กลุ่มแบบไม่สมดุลและค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเป็น 120:30:30:30:30:30, 150:24:24:24:24:24, และ 180:18:18:18:18:18 ตามลำดับ โดยในทุกชุดทดสอบยังคงกำหนดผลรวมค่า D_i ทั้งหมดไว้ที่ 270 ท่อน ชุดทดสอบเหล่านี้จะย้ายกลุ่มช่วงที่ใช้ค่าผลรวม D_i ที่สูงกว่าไปตามกลุ่มช่วงต่าง ๆ จากกลุ่มช่วงที่ 1, 2, 3, 4, 5, และ 6 ตามลำดับ ทั้งนี้ชุดทดสอบเหล่านี้มีเป้าประสงค์เพื่อเปรียบเทียบขนาดผลกระทบของความไม่สมดุลของจำนวนที่ต้องการระหว่างกลุ่มช่วงขนาดต่างๆ เมื่อยิ่งมีความไม่สมดุลเพิ่มขึ้น

ชุดทดสอบทั้ง 37 ชุดนี้ถูกออกแบบให้มีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าจำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i) เพื่อให้เกิดเป็นกรณีต่าง ๆ อย่างหลากหลายและเป็นระบบ ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างกันของการกระจายและสัดส่วนการกระจายของค่าผลรวมของ D_i ระหว่างกลุ่มช่วงขนาดความยาวต่าง ๆ กัน โดยค่าปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลกระทบจะถูกควบคุมให้คงที่ในทุกชุดทดสอบ รวมถึงขนาดท่อนความยาวที่แตกต่างกัน (L_i) ทั้ง 18 ขนาดจะถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่เท่ากัน (เท่ากับของโจทย์ปัญหาฐาน) โดยตลอด และช่วงขนาดความยาวถูกพิจารณาแบ่งออกเป็น 6 กลุ่มช่วง แต่ละช่วงมี 3 ขนาดที่แตกต่างกัน ผลคำตอบที่ได้จากการทดสอบซ้ำ ๆ เดิมจำนวน 100 ครั้งในแต่ละชุดทดสอบเหล่านี้จะถูกนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบทางสถิติเพื่อหาความเหมือนหรือความต่างกันอย่างมีนัยสำคัญต่อไป

ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ จะเป็นการเรียกโปรแกรมชุดคำสั่งอัตโนมัติที่สร้างขึ้นเอง ซึ่งจะเริ่มการทำงานจากการป้อนข้อมูลนำเข้าที่เป็นโจทย์ปัญหาที่สุ่มค่าขึ้นหรือกำหนดค่าให้ตามที่ออกแบบไว้เป็นชุดทดสอบต่าง ๆ เหล่านี้ ใส่ลงในแผ่นคำนวณที่เป็นพื้นที่ของแบบจำลองปัญหาในโปรแกรม Microsoft Excel จากนั้นจึงดำเนินการหาคำตอบที่ดีที่สุดตามหลักการที่ใช้อ้างอิง ประกอบด้วย การสร้างเซตเริ่มต้นของรูปแบบการตัดที่ประสิทธิภาพดี และการหาจำนวนการตัดซ้ำตามรูปแบบ ซึ่งจะมี

การเรียกใช้โปรแกรม Solver เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วย พร้อมทั้งการบันทึกค่าคำตอบที่ได้ในแต่ละครั้ง แล้วจึงวนรอบซ้ำการทดสอบเดิมเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนครบ 100 ครั้งตามที่กำหนด โดยค่าข้อมูลนำเข้าจะมีการสุ่มค่าขึ้นใหม่แต่ละครั้ง ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ของแต่ละชุดทดสอบ เมื่อสิ้นสุดการทดสอบวนรอบซ้ำตามที่กำหนดจะได้ผลคำตอบที่บันทึกไว้ในแผ่นคำนวณของโปรแกรม Excel จำนวนมาก ซึ่งจะนำมาวิเคราะห์ต่อไปเพื่อสรุปผลอีกครั้ง

4.9 การวิเคราะห์ผลการทดสอบชุดที่ 1

ผลการทดสอบทั้งหมด 37 ชุดทดสอบได้แสดงไว้ในตารางข้างล่างนี้ ซึ่งมีผลของค่าต่าง ๆ ที่คัดเลือกมาแสดงไว้ 3 ค่า ได้แก่ ค่าเฉลี่ยของผลรวมจำนวนวัสดุคงคลังที่ใช้ (Average Sum(X_j)), ค่าเฉลี่ยของร้อยละของเศษการตัดรวม (Average *%waste*), และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของร้อยละของเศษการตัดรวม (Standard Deviation of *%waste*) ทั้งนี้ไม่ได้นำแผนการตัดคำตอบที่ดีที่สุดจากการทดสอบแต่ละครั้งมาแสดงด้วย เนื่องจากมีข้อมูลจำนวนมาก (ประกอบด้วย เซตของรูปแบบการตัดและจำนวนครั้งการตัดซ้ำ) แต่เลือกบางส่วนแสดงไว้ในภาคผนวก ข้อมูลค่าเฉลี่ยของร้อยละของเศษการตัดรวม (Average *%waste*) ถูกนำมาใช้เป็นหลักในการเปรียบเทียบและประเมินคำตอบที่ได้จากการทดสอบด้วยหลักการทางสถิติ คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และการวิเคราะห์ one-tailed t-Test เพื่อหาความแตกต่างระหว่างกลุ่มข้อมูลผลการทดสอบจำนวนมากกว่าหรือเท่ากับ 2 กลุ่มขึ้นไป ซึ่งจะเป็นการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis test) ที่ว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลทั้งสองหรือมากกว่าเหล่านั้นเท่ากันหรือไม่ โดยจะใช้ค่าระดับนัยสำคัญหรือค่า alpha ที่เท่ากับ 0.05 ตลอดทุกการวิเคราะห์ การวิเคราะห์ผลนี้จัดแบ่งออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ เพื่อการเปรียบเทียบค่าระหว่างกัน ผลที่ได้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สำหรับผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 1 ถึง 6 ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วย ANOVA ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงว่า F [10.04] > $F\ crit$ [2.23] แปลความหมายได้ว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดการทดสอบทั้ง 6 นี้มีค่าไม่เท่ากัน อย่างไรก็ตามค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 4 มีค่าที่แตกต่างจากชุดอื่นอย่างสังเกตได้ ดังนั้นจึงได้นำข้อมูลของชุดการทดสอบที่ 4 ออก แล้วจึงวิเคราะห์ซ้ำอีกครั้งกับข้อมูลที่เหลือ คราวนี้กลับพบว่า F [1.08] < $F\ crit$ [2.39] จึงหมายความว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดการทดสอบทั้ง 5 ชุด ได้แก่ 1, 2, 3, 5, และ 6 มีค่าเท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยกันเองระหว่างกลุ่มทั้งหมดจะพบว่า ชุดการทดสอบที่ 4 ให้ค่าที่ต่ำที่สุด ในขณะที่ชุดการทดสอบที่เหลือทั้ง 5 ชุดมีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันเองและยังใกล้เคียงกับค่าของโจทย์ปัญหาฐาน

สำหรับผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 7 ถึง 9 แปรผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบด้วย ANOVA ได้ว่า ค่าเฉลี่ยของทั้งสามชุดมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจาก F [3.42] < $F\ crit$ [3.03] เมื่อสังเกตความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเห็นได้ว่า ชุดการทดสอบที่ 8 มีค่าที่แตกต่างจากกลุ่มจึงนำแยกออกไปแล้วทำการวิเคราะห์

ซ้ำกับ 2 ชุดที่เหลือด้วย one-tailed t-Test ได้ผลการวิเคราะห์ว่าค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 7 และ 9 มีค่าเท่ากันด้วยค่า *t Stat* [0.19] < *t Crit* [1.65] และค่าเฉลี่ยของทั้ง 2 ชุดมีค่ามากกว่าของชุดการทดสอบที่ 8 ด้วยค่า *t Stat* [2.17 และ 2.26] > *t Crit* [1.65] ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบโดยสรุปจากชุดการทดสอบทั้ง 37 ชุด

Test no.	**Treatments:**											**Results:**		
	Variations of *Li* and *Di*				**Dominating group with *Di***	**Total of *Di* of Group#**						**Average Sum*Xj***	**Average *%waste***	**S.D. of *%waste***
						1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**			
Base	Fix Li	All G	Fix Di	All G	All equal	45	45	45	45	45	45	108	2.61	n.a.
1	Fix Li	All G	Vary Di	G1	All equal	45	45	45	45	45	45	108.3	2.83	0.31
2	Fix Li	All G	Vary Di	G2	All equal	45	45	45	45	45	45	108.3	2.84	0.28
3	Fix Li	All G	Vary Di	G3	All equal	45	45	45	45	45	45	108.3	2.80	0.28
4	Fix Li	All G	Vary Di	G4	All equal	45	45	45	45	45	45	108.0	2.63	0.20
5	Fix Li	All G	Vary Di	G5	All equal	45	45	45	45	45	45	108.4	2.84	0.29
6	Fix Li	All G	Vary Di	G6	All equal	45	45	45	45	45	45	108.4	2.89	0.33
7	Fix Li	All G	Vary Di	G1+G2	n.a.	=== 90 ===		45	45	45	45	108.5	2.94	0.31
8	Fix Li	All G	Vary Di	G3+G4	n.a.	45	45	=== 90 ===		45	45	108.8	2.83	0.37
9	Fix Li	All G	Vary Di	G5+G6	n.a.	45	45	45	45	=== 90 ===		109.9	2.95	0.34
10	Fix Li	All G	Vary Di	All G	n.a.	================ 270 =============						112.8	3.69	1.33
11	Fix Li	All G	Vary Di	All G	n.a.	================ 270 =============						113.3	3.68	1.48
12	Fix Li	All G	Vary Di	All G	All equal	45	45	45	45	45	45	108.9	2.99	0.43
13	Fix Li	All G	Vary Di	All G	All equal	45	45	45	45	45	45	109.0	3.03	0.45
14	Fix Li	All G	Vary Di	All G	G1	90	36	36	36	36	36	89.4	1.95	0.49
15	Fix Li	All G	Vary Di	All G	G2	36	90	36	36	36	36	94.0	2.25	0.51
16	Fix Li	All G	Vary Di	All G	G3	36	36	90	36	36	36	102.5	2.48	0.44
17	Fix Li	All G	Vary Di	All G	G4	36	36	36	90	36	36	112.9	4.14	0.94
18	Fix Li	All G	Vary Di	All G	G5	36	36	36	36	90	36	126.3	10.35	1.91
19	Fix Li	All G	Vary Di	All G	G6	36	36	36	36	36	90	139.2	6.03	1.65
20	Fix Li	All G	Vary Di	All G	G1	120	30	30	30	30	30	77.6	1.64	0.61
21	Fix Li	All G	Vary Di	All G	G2	30	120	30	30	30	30	84.7	1.89	0.53
22	Fix Li	All G	Vary Di	All G	G3	30	30	120	30	30	30	98.2	2.34	0.37
23	Fix Li	All G	Vary Di	All G	G4	30	30	30	120	30	30	116.6	5.92	0.96
24	Fix Li	All G	Vary Di	All G	G5	30	30	30	30	120	30	150.1	24.70	3.01
25	Fix Li	All G	Vary Di	All G	G6	30	30	30	30	30	120	161.2	8.29	2.09
26	Fix Li	All G	Vary Di	All G	G1	150	24	24	24	24	24	65.2	1.56	0.63
27	Fix Li	All G	Vary Di	All G	G2	24	150	24	24	24	24	75.1	1.83	0.55
28	Fix Li	All G	Vary Di	All G	G3	24	24	150	24	24	24	94.4	2.54	0.69
29	Fix Li	All G	Vary Di	All G	G4	24	24	24	150	24	24	120.3	7.87	0.87
30	Fix Li	All G	Vary Di	All G	G5	24	24	24	24	150	24	174.0	37.91	3.69
31	Fix Li	All G	Vary Di	All G	G6	24	24	24	24	24	150	182.9	10.40	2.62
32	Fix Li	All G	Vary Di	All G	G1	180	18	18	18	18	18	52.8	1.58	0.76
33	Fix Li	All G	Vary Di	All G	G2	18	180	18	18	18	18	65.8	1.95	0.51
34	Fix Li	All G	Vary Di	All G	G3	18	18	180	18	18	18	91.0	3.09	1.14

35	**Fix Li**	**All G**	**Vary Di**	**All G**	**G4**	**18**	**18**	**18**	**180**	**18**	**18**	**124.2**	**9.83**	**0.98**
36	**Fix Li**	**All G**	**Vary Di**	**All G**	**G5**	**18**	**18**	**18**	**18**	**180**	**18**	**198.0**	**49.19**	**4.43**
37	**Fix Li**	**All G**	**Vary Di**	**All G**	**G6**	**18**	**18**	**18**	**18**	**18**	**180**	**204.8**	**11.21**	**2.36**

สำหรับการเปรียบเทียบค่าผลคำตอบของคู่ชุดการทดสอบที่ 10 กับ 11 และคู่ชุดการทดสอบที่ 12 และ 13 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของแต่ละคู่ที่เปรียบเทียบพบว่ามีค่าเท่ากันด้วยค่า *t Stat* [0.03] < *t Crit* [1.65] และ *t Stat* [abs(-055)] < *t Crit* [1.65] ตามลำดับ ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบซ้ำด้วยการรวมข้อมูลของชุดการทดสอบแต่ละคู่เข้าด้วยกัน แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบกันใหม่พบว่ามีค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกัน โดยที่ค่าเฉลี่ยของกลุ่มชุดที่ 10+11 มีค่ามากกว่ากลุ่มชุดที่ 12+13 ด้วยค่า *t Stat* [6.54] < *t Crit* [1.65]

สำหรับผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 14 ถึง 19 ได้ทำการจับคู่กันคราวละ 2 ชุดเพื่อทำการเปรียบเทียบกันเป็นคู่ ๆ (pairwise comparisons) รวมทั้งหมด 5 คู่ดังนี้คือ ผลของชุดการทดสอบที่ 15 กับ 14, 16 กับ 15, 17 กับ 16, 18 กับ 17 และ 19 กับ 18 โดยทำการวิเคราะห์ด้วย one-tailed t-Test ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดการทดสอบเหล่านี้มีค่าไม่เท่ากันอย่างมีนัยยะสำคัญ แต่มีค่าเรียงจากน้อยไปมากได้ตามลำดับดังนี้คือ ค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 14 < 15 < 16 < 17 < 19 <18 โดยที่ค่า *t Stat* และ *t Crit* ที่ได้จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบรายคู่เหล่านี้แสดงในตารางข้างล่าง

สำหรับผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 20 ถึง 25 ได้ทำการจับคู่แล้ววิเคราะห์เปรียบเทียบกันเป็นรายคู่เช่นเดียวกับที่ผ่านมา ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบเหล่านี้มีค่าไม่เท่ากัน แต่มีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับดังนี้คือ ค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 20 < 21 < 22 < 23 < 25 < 24

สำหรับผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 26 ถึง 31 ผลจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบเป็นรายคู่ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบเหล่านี้มีค่าไม่เท่ากัน แต่มีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับดังนี้คือ ค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 26 < 27 < 28 < 29 < 31 < 30

สำหรับผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 32 ถึง 37 ผลจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบเป็นรายคู่ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบเหล่านี้มีค่าไม่เท่ากัน แต่มีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับดังนี้คือ ค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 32 < 33 < 34 < 35 < 37 < 36

นอกจากนี้ยังมีการจับคู่เพื่อการวิเคราะห์เปรียบเทียบ (pairwise comparisons) แบบข้ามกลุ่มเพื่อดูแนวโน้มของผลคำตอบ โดยได้ทำการจับคู่เปรียบเทียบกันรวม 3 คู่ดังนี้ ผลของชุดการทดสอบที่ 20 กับ 14, 26 กับ 20, และ 32 กับ 26 ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบที่ 14 มีค่าสูงกว่าชุดที่ 20 แต่ผลของอีก 2 คู่ที่เหลือมีค่าเฉลี่ยเท่ากัน และการจับคู่เปรียบเทียบแบบข้ามกลุ่มอีก 3 คู่คือ ผลของชุดการทดสอบที่ 23 กับ 17, 29 กับ 23, และ 35 กับ 29 ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบเหล่านี้มีค่าไม่เท่ากัน แต่มีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับดังนี้คือ ค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบ

ที่ 17 < 23 < 29 < 35 ซึ่งค่าทางสถิติที่ได้จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบรายคู่เหล่านี้แสดงไว้ในตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลคำตอบจากชุดการทดสอบทั้ง 37 ชุด

%waste data from tests	Analysis method	Null hypothesis	*F* or *t Stat*	*p-value*	*F* or *t* Crit	Result	Interpret		
Test 1, 2, 3, 4, 5, 6	ANOVA	All means are equal	10.040	3.1E-09	2.229	Reject null		<>	
Test 1, 2, 3, 5, 6	ANOVA	All means are equal	1.085	3.6E-01	2.390	Accept null		=	
Test 7, 8, 9	ANOVA	All means are equal	3.418	3.4E-02	3.026	Reject null		<>	
Test 7 and 9	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	0.189	4.3E-01	1.653	Accept null	7	=	9
Test 7 and 8	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	2.166	1.6E-02	1.653	Reject null	7	>	8
Test 9 and 8	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	2.259	1.3E-02	1.653	Reject null	9	>	8
Test 10 and 11	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	0.028	4.9E-01	1.653	Accept null	10	=	11
Test 12 and 13	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-0.549	2.9E-01	1.653	Accept null	12	=	13
Test 10+11 and 12+13	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	6.540	1.9E-10	1.651	Reject null	10+11	>	12+13
Test 15 and 14	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	4.172	2.3E-05	1.653	Reject null	15	>	14
Test 16 and 15	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	3.462	3.3E-04	1.653	Reject null	16	>	15
Test 17 and 16	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	16.053	7.6E-34	1.656	Reject null	17	>	16
Test 18 and 17	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	29.184	1.2E-62	1.656	Reject null	18	>	17
Test 19 and 18	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-17.107	6.6E-41	1.653	Reject null	19	<	18
Test 21 and 20	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	3.142	9.7E-04	1.653	Reject null	21	>	20
Test 22 and 21	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	6.899	4.4E-11	1.653	Reject null	22	>	21
Test 23 and 22	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	34.963	1.2E-67	1.657	Reject null	23	>	22
Test 24 and 23	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	59.509	1.1E-90	1.658	Reject null	24	>	23
Test 25 and 24	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-44.830	1.6E-98	1.654	Reject null	25	<	24
Test 27 and 26	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	3.203	7.9E-04	1.653	Reject null	27	>	26
Test 28 and 27	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	8.136	2.7E-14	1.653	Reject null	28	>	27
Test 29 and 28	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	47.991	9.8E-108	1.653	Reject null	29	>	28
Test 30 and 29	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	79.332	3.2E-99	1.659	Reject null	30	>	29
Test 31 and 30	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-60.865	7.6E-122	1.653	Reject null	31	<	30
Test 33 and 32	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	4.114	3.0E-05	1.654	Reject null	33	>	32
Test 34 and 33	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	9.131	3.9E-16	1.656	Reject null	34	>	33
Test 35 and 34	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	44.878	1.1E-104	1.653	Reject null	35	>	34
Test 36 and 35	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	86.858	9.0E-103	1.659	Reject null	36	>	35
Test 37 and 36	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-75.746	2.5E-122	1.655	Reject null	37	<	36
Test 20 and 14	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-3.971	5.1E-05	1.653	Reject null	20	<	14
Test 26 and 20	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-0.922	1.8E-01	1.653	Accept null	26	=	20
Test 32 and 26	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	0.178	4.3E-01	1.653	Accept null	32	=	26
Test 23 and 17	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	13.287	1.6E-29	1.653	Reject null	23	>	17
Test 29 and 23	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	15.059	7.4E-35	1.653	Reject null	29	>	23
Test 35 and 29	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	14.988	1.4E-34	1.653	Reject null	35	>	29

ข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวสำหรับค่าตัวแปรจำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i) มีดังนี้ การกระจายของจำนวนท่อนที่ต้องการอย่างสม่ำเสมอ (uniform distribution) ไปในขนาดความยาวที่ต้องการต่าง ๆ จะทำให้เกิดปริมาณเศษการตัดรวมจากแผนการตัดที่ดีที่สุดน้อยกว่าการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอ หากการกระจายอย่างไม่สม่ำเสมอดังกล่าวนี้เกิดขึ้นในวงกว้างไปในหลายช่วงขนาดความยาวที่ต้องการจะยิ่งก่อให้เกิดปริมาณเศษการตัดรวมมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ความไม่สม่ำเสมอนี้หากเกิดกับขนาดช่วงความยาวขนาดกลาง (intermediate lengths) หรือกลุ่มช่วงขนาดที่ 4 จะส่งผลต่อปริมาณเศษการตัดรวมที่มากขึ้นในอัตราที่น้อยกว่าความไม่สม่ำเสมอที่เกิดกับกลุ่มช่วงความยาวขนาดสั้น (short lengths) หรือกลุ่มช่วงขนาดที่ 1, 2, 3 และกลุ่มช่วงความยาวขนาดยาว (long lengths) หรือกลุ่มช่วงขนาดที่ 5, 6

หากพิจารณาถึงปัจจัยสัดส่วน (proportion) ของจำนวนท่อนที่ต้องการที่มีผลต่อปริมาณเศษการตัดรวม จะได้ว่าหากจำนวนท่อนที่ต้องการของกลุ่มช่วงความยาวขนาดสั้น (กลุ่มช่วงขนาดที่ 1 และ 2) มีสัดส่วนที่มากกว่าจะช่วยให้ปริมาณเศษการตัดรวมลดลงได้ แต่ในทางกลับกัน หากจำนวนท่อนที่ต้องการของกลุ่มช่วงความยาวขนาดยาว (กลุ่มช่วงขนาดที่ 5 และ 6) มีสัดส่วนที่มากกว่าจะทำให้ปริมาณเศษการตัดรวมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สัดส่วนที่มากกว่าของกลุ่มช่วงขนาดที่ 5 จะส่งผลต่อการทำให้ปริมาณเศษเพิ่มขึ้นในอัตราที่มากกว่าของกลุ่มช่วงขนาดที่ 6 และยิ่งมีดีกรีความไม่สม่ำเสมอของสัดส่วนยิ่งมาก จะยิ่งทำให้อัตราการเพิ่มของปริมาณเศษยิ่งเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

4.10 แบบแผนการทดสอบชุดที่ 2

เพื่อเป็นการขยายการทดสอบให้กว้างขวางกับตัวแปรสำคัญของโจทย์ปัญหา แบบแผนการทดสอบอีกหนึ่งชุดจึงถูกออกแบบให้กำหนดปรับเปลี่ยนค่าขนาดความยาวของท่อนความต้องการ (L_i) และรวมทั้งจำนวนความต้องการของแต่ละขนาดความยาว (D_i) อย่างเป็นระบบ ซึ่งขนาดความยาวที่ต้องการเหล่านี้ยังคงถูกจัดแบ่งเป็นกลุ่ม ๆ ตามช่วงขนาดความยาว กลุ่มละ 3 ขนาด รวมจำนวน 6 กลุ่ม ทั้งนี้เพื่อควบคุมให้โจทย์ปัญหาในแต่ละการทดสอบยังคงมีความหลากหลายของขนาดความยาวที่ต้องการครอบคลุมอยู่ทุกช่วงขนาด แต่ทั้งนี้เพื่อให้เห็นผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปร L_i และ D_i ของโจทย์ทดสอบที่มีต่อร้อยละของเศษการตัดที่เกิดขึ้น ชุดการทดสอบมีจำนวนทั้งหมด 54 ชุด แต่ละชุดจะถูกทดสอบซ้ำ ๆ เป็นจำนวน 100 ครั้ง เพื่อให้มีข้อมูลผลการทดสอบจำนวนมากเพียงพอต่อการวิเคราะห์ทางสถิติและสร้างบทสรุปทั่วไปได้ รายละเอียดของชุดการทดสอบทั้งหมด พร้อมทั้งค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลการปรับเปลี่ยนค่า L_i และ D_i ของโจทย์ปัญหาและค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบทั้ง 54 ชุด

Test no.	Variations of *Li* and *Di*				Treatments: Dominating group with *Di*	Total of *Di* of Group# 1	2	3	4	5	6	Results: Average Sum*Xj*	Average *%waste*	S.D. of *%waste*
Base	Fix Li	All G	Fix Di	All G	All equal	45	45	45	45	45	45	108	2.61	n.a.
1	Vary Li	G1	Fix Di	All G	All equal	45	45	45	45	45	45	109.2	3.74	2.08
2	Vary Li	G2	Fix Di	All G	All equal	45	45	45	45	45	45	108.8	2.91	0.39
3	Vary Li	G3	Fix Di	All G	All equal	45	45	45	45	45	45	107.3	2.69	0.43
4	Vary Li	G4	Fix Di	All G	All equal	45	45	45	45	45	45	106.6	2.00	0.37
5	Vary Li	G5	Fix Di	All G	All equal	45	45	45	45	45	45	110.1	2.60	0.94
6	Vary Li	G6	Fix Di	All G	All equal	45	45	45	45	45	45	107.5	2.73	0.58
7	Vary Li	All G	Fix Di	All G	All equal	45	45	45	45	45	45	109.5	3.21	1.73
8	Vary Li	All G	Vary Di	All G	All equal	45	45	45	45	45	45	111.0	4.23	2.51
9	Vary Li	All G	Vary Di	All G	All equal	45	45	45	45	45	45	110.8	4.33	2.32
10	Vary Li	All G	Vary Di	All G	All equal	45	45	45	45	45	45	111.0	4.47	2.70
11	Vary Li	All G	Vary Di	All G	All equal	45	45	45	45	45	45	111.8	4.47	2.87
12	Vary Li	All G	Vary Di	All G	All equal	45	45	45	45	45	45	110.5	4.03	2.11
13	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G1	90	36	36	36	36	36	90.7	2.05	1.05
14	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G2	36	90	36	36	36	36	95.5	2.54	1.35
15	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G3	36	36	90	36	36	36	103.2	3.93	2.46
16	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G4	36	36	36	90	36	36	113.8	5.48	3.21
17	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G5	36	36	36	36	90	36	135.2	14.98	4.50
18	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G6	36	36	36	36	36	90	142.2	7.53	2.97
19	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G1	120	30	30	30	30	30	77.3	1.46	0.65
20	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G2	30	120	30	30	30	30	86.3	2.28	1.29
21	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G3	30	30	120	30	30	30	98.6	4.10	2.93
22	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G4	30	30	30	120	30	30	116.9	7.43	3.72
23	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G5	30	30	30	30	120	30	158.2	26.37	5.50
24	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G6	30	30	30	30	30	120	163.2	10.48	4.15
25	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G1	150	24	24	24	24	24	65.6	1.43	0.72
26	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G2	24	150	24	24	24	24	77.3	2.27	1.29
27	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G3	24	24	150	24	24	24	95.2	4.92	2.90
28	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G4	24	24	24	150	24	24	119.8	10.41	4.30
29	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G5	24	24	24	24	150	24	179.0	34.61	6.91
30	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G6	24	24	24	24	24	150	184.9	12.83	5.66
31	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G1	160	40	40	40	40	40	103.9	1.35	1.03
32	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G2	40	160	40	40	40	40	116.2	2.30	1.39
33	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G3	40	40	160	40	40	40	132.3	3.60	2.09
34	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G4	40	40	40	160	40	40	157.5	8.60	4.77
35	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G5	40	40	40	40	160	40	208.9	24.96	4.44
36	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G6	40	40	40	40	40	160	217.0	10.40	4.28
37	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G1	80	20	20	20	20	20	52.0	2.12	1.54
38	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G2	20	80	20	20	20	20	58.2	2.76	1.42
39	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G3	20	20	80	20	20	20	65.8	3.99	2.15
40	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G4	20	20	20	80	20	20	78.9	8.52	5.15
41	Vary Li	All G	Vary Di	All G	G5	20	20	20	20	80	20	104.5	24.97	4.15

42	**Vary Li**	**All G**	**Vary Di**	**All G**	**G6**	**20**	**20**	**20**	**20**	**20**	**80**	**109.1**	**10.50**	**4.53**
43	**Vary Li**	**All G**	**Vary Di**	**All G**	**All equal**	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**	**220.7**	**4.03**	**2.23**
44	**Vary Li**	**All G**	**Vary Di**	**All G**	**All equal**	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**	**222.9**	**4.39**	**2.94**
45	**Vary Li**	**All G**	**Vary Di**	**All G**	**All equal**	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**	**221.9**	**4.29**	**2.78**
46	**Vary Li**	**All G**	**Vary Di**	**All G**	**All equal**	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**	**221.1**	**4.51**	**3.29**
47	**Vary Li**	**All G**	**Vary Di**	**All G**	**All equal**	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**	**222.4**	**4.32**	**2.43**
48	**Vary Li**	**All G**	**Vary Di**	**All G**	**All equal**	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**	**221.4**	**4.24**	**2.19**
49	**Vary Li**	**All G**	**Vary Di**	**All G**	**All equal**	**24**	**24**	**24**	**24**	**24**	**24**	**59.9**	**5.28**	**3.15**
50	**Vary Li**	**All G**	**Vary Di**	**All G**	**All equal**	**24**	**24**	**24**	**24**	**24**	**24**	**59.6**	**4.98**	**3.06**
51	**Vary Li**	**All G**	**Vary Di**	**All G**	**All equal**	**24**	**24**	**24**	**24**	**24**	**24**	**59.1**	**4.37**	**2.30**
52	**Vary Li**	**All G**	**Vary Di**	**All G**	**All equal**	**24**	**24**	**24**	**24**	**24**	**24**	**59.8**	**4.60**	**2.69**
53	**Vary Li**	**All G**	**Vary Di**	**All G**	**All equal**	**24**	**24**	**24**	**24**	**24**	**24**	**59.7**	**4.95**	**2.72**
54	**Vary Li**	**All G**	**Vary Di**	**All G**	**All equal**	**24**	**24**	**24**	**24**	**24**	**24**	**59.1**	**4.39**	**2.54**

สำหรับชุดทดสอบที่ 1 ถึง 6 ได้ถูกกำหนดให้มีการสุ่มเปลี่ยนแปลงขนาดท่อนความยาวที่ต้องการ (L_i) ที่เป็นตัวโจทย์ปัญหา โดยในแต่ละครั้งของการทดสอบจะมีการสุ่มค่าขนาดท่อนความยาวที่ต้องการขึ้นใหม่ทุกครั้ง (รวมจำนวนทั้งหมด 100 ครั้ง ต่อ 1 ชุดทดสอบ) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่า L_i แบบสุ่มนี้จะถูกควบคุมให้อยู่ภายในขอบเขตความยาวประเภทของแต่ละกลุ่มช่วงขนาดความยาว (1 กลุ่มช่วงประกอบด้วย 3 ขนาดที่ต่างกัน) จากกลุ่มช่วงขนาดที่ 1 ไปจนถึง 6 ทีละชุดทดสอบตามลำดับ ในขณะที่กำหนดให้จำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i) ของแต่ละขนาดความยาวมีค่าคงที่เสมอเท่ากับ 15 ท่อน รวม 45 ท่อนต่อกลุ่มช่วงขนาด การปรับเปลี่ยนค่า L_i อย่างสุ่มนี้จะทำทีละกลุ่มช่วงสำหรับแต่ละชุดทดสอบ โดยที่กลุ่มช่วงที่เหลือที่ไม่ได้ถูกปรับเปลี่ยนก็จะใช้ค่าเริ่มต้นของโจทย์ปัญหาฐานดังแสดงในตาราง 4.1 ชุดทดสอบที่ 1 ถึง 6 นี้มีเป้าประสงค์เพื่อหาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวที่ต้องการแบบจำกัดวงแคบ (local demand variation) ไว้ที่เพียงหนึ่งกลุ่มช่วงความยาว

ลักษณะการ treatment ของชุดทดสอบที่ 1 ถึง 6 ถูกกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงคราวละกลุ่มช่วงไม่พร้อมกัน (separate change) กลุ่มที่เหลือที่ไม่ได้ถูกเปลี่ยนแปลงจะใช้ค่า L_i เริ่มต้นเดิมของโจทย์ปัญหาฐาน แต่สำหรับชุดทดสอบที่ 7 ถึง 54 หรือชุดทดสอบจากนี้ไปจะใช้นโยบายการเปลี่ยนแปลงพร้อมกัน (simultaneous change) ทั้งหมดทุกกลุ่มช่วงความยาวทั้ง 6 กลุ่ม โดยที่การกระจายของจำนวนความต้องการ (D_i) ระหว่างกลุ่มช่วงต่าง ๆ จะถูกควบคุมไว้ให้ต่างกันแล้วแต่กรณีดังนี้

สำหรับชุดทดสอบที่ 7 เป็นการกำหนดให้เปลี่ยนแปลงขนาดท่อนความยาวที่ต้องการ (L_i) อย่างสุ่มพร้อมกันทุกขนาด รวมทั้ง 18 ขนาดของโจทย์ปัญหาในการทดสอบแต่ละครั้ง โดยยังคงควบคุมขนาดความยาวที่สุ่มขึ้นมานี้ให้สอดคล้องกับขอบเขตของกลุ่มช่วงขนาดแต่ละช่วงที่กำหนดไว้รวม 6 ช่วง ในแต่ละขนาด กำหนดให้จำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i) ของแต่ละขนาดความยาวมีค่าคงที่เสมอ

เท่ากับ 15 ท่อน หรือรวม 45 ท่อนต่อกลุ่มช่วงขนาด ชุดทดสอบที่ 7 นี้มีเป้าประสงค์เพื่อหาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความต้องการในวงที่ขยายกว้างจนครอบคลุมตลอดทุกช่วงขนาดความยาว

สำหรับชุดทดสอบที่ 8 ถึง 12 เป็นชุดทดสอบที่มีการ treatment เหมือนกันและเป็นการทดสอบซ้ำ คือการกำหนดให้เปลี่ยนแปลงขนาดท่อนความยาวที่ต้องการ (L_i) อย่างสุ่มพร้อมกันทุกขนาด (กำหนดกลุ่มช่วงขนาดไว้ 6 กลุ่มเช่นเดิม) พร้อมทั้งเปลี่ยนแปลงจำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i) ของแต่ละขนาดความยาวอย่างสุ่ม แต่ยังคงควบคุมให้ผลรวมของ D_i ของกลุ่มคงที่เสมอเท่ากับ 45 ท่อน ชุดทดสอบเหล่านี้จึงมีเป้าประสงค์เพื่อหาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่พร้อมกันทั้งสองตัวแปรของความต้องการในวงที่กว้างครอบคลุมตลอดทุกช่วงขนาดความยาว

สำหรับชุดทดสอบที่ 13 ถึง 18 กำหนดให้เปลี่ยนแปลงขนาดท่อนความยาวที่ต้องการ (L_i) อย่างสุ่มพร้อมกันทั้ง 6 ช่วงขนาด ในทุกการทดสอบ รวมทั้งเปลี่ยนแปลงจำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i) ของแต่ละขนาดความยาวอย่างสุ่ม ในทุกการทดสอบเช่นกัน โดยกำหนดผลรวมของ D_i ของกลุ่มช่วงเป็นค่าคงที่ ที่ทำให้เกิดความไม่สมดุลกันคือ ชุดทดสอบที่ 13 มีค่าผลรวมของ D_i ของกลุ่มช่วงที่ 1 เท่ากับ 90 ท่อนมากกว่าของกลุ่มช่วงอื่นที่เหลือที่ให้เท่ากันเท่ากับ 36 ท่อน ทำให้สัดส่วนของค่าผลรวม D_i ของทั้ง 6 กลุ่มช่วงเป็น 90:36:36:36:36:36 ท่อน โดยมีจำนวนท่อนในขนาดของกลุ่มช่วงที่ 1 อยู่มากกว่ากลุ่มอื่น ทั้งนี้ผลรวมจำนวน D_i ทั้งหมดยังคงเท่ากับชุดทดสอบอื่น ๆ คือ 270 ท่อน โดยที่ค่าผลรวมของ D_i ที่มากที่สุดคือ 90 จะเปลี่ยนจากกลุ่มช่วงที่ 1 ไปสู่กลุ่มช่วงที่ 2, 3, 4, 5, และ 6 สำหรับชุดทดสอบที่ 13 ถึง 18 ตามลำดับ ทั้งนี้ชุดทดสอบเหล่านี้มีเป้าประสงค์เพื่อหาผลกระทบของความไม่สมดุลของจำนวนที่ต้องการระหว่างกลุ่มช่วงขนาดต่างๆ

สำหรับชุดทดสอบที่ 19 ถึง 24, และที่ 25 ถึง 30 จะให้กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนค่าที่คล้ายคลึงกันกับกลุ่มชุดทดสอบก่อนหน้า กล่าวคือจะกำหนดใช้สัดส่วนของค่าผลรวมของ D_i ของแต่ละกลุ่มช่วงทั้ง 6 กลุ่มแบบไม่สมดุลและค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเป็น 120:30:30:30:30:30, และ 150:24:24:24:24:24 ตามลำดับ โดยในทุกชุดทดสอบยังคงมีค่าผลรวม D_i ของทุกช่วงกลุ่มทั้งหมดเท่ากับ 270 ท่อน ชุดทดสอบเหล่านี้จะย้ายกลุ่มช่วงที่ใช้ค่าผลรวม D_i ที่สูงกว่าไปตามกลุ่มช่วงต่าง ๆ จากกลุ่มช่วงที่ 1, 2, 3, 4, 5, และ 6 ตามลำดับ ทั้งนี้ชุดทดสอบเหล่านี้มีเป้าประสงค์เพื่อเปรียบเทียบขนาดผลกระทบของความไม่สมดุลของจำนวนที่ต้องการระหว่างกลุ่มช่วงขนาดต่างๆ เมื่อยิ่งมีความไม่สมดุลเพิ่มขึ้น

สำหรับชุดทดสอบที่ 31 ถึง 36, และที่ 37 ถึง 42 จะยังคงเป็นการใช้ treatment กระทำกับสัดส่วนของค่าผลรวมของ D_i ของแต่ละกลุ่มช่วงทั้ง 6 กลุ่มแบบไม่สมดุล แต่เลือกพิจารณาความไม่สมดุลที่อัตราส่วน 4:1:1:1:1:1 (เป็นอัตราส่วนเดียวกับกลุ่มชุดทดสอบที่ 19 ถึง 24) โดยเพิ่มค่าผลรวมของ D_i ของแต่ละกลุ่มช่วงทั้ง 6 กลุ่ม เป็น 160:40:40:40:40:40 และ 80:20:20:20:20:20 ตามลำดับ ดังนั้นชุดทดสอบเหล่านี้จึงมีค่าผลรวม D_i ของทุกช่วงกลุ่มทั้งหมดไม่เท่ากับ 270 ท่อนเช่นที่ผ่านมาทั้งหมด แต่กลับเป็น 360 และ 180 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าเดิม และน้อยกว่าเดิม ทั้งนี้ชุดทดสอบเหล่านี้

มีเป้าประสงค์เพื่อเปรียบเทียบขนาดผลกระทบของความไม่สมดุลของจำนวนที่ต้องการระหว่างกลุ่มช่วงขนาดต่างๆ เมื่อจำนวนผลรวม D_i ต่างกัน แต่อัตราส่วนของจำนวนระหว่างกลุ่มคงที่

สำหรับชุดทดสอบที่ 43 ถึง 48, และที่ 49 ถึง 54 เป็นชุดทดสอบที่มีการ treatment เหมือนกันและเป็นการทดสอบซ้ำ คือการกำหนดให้เปลี่ยนแปลงขนาดท่อนความยาวที่ต้องการ (L_i) อย่างสุ่มพร้อมกันทั้ง 6 ช่วงขนาด พร้อมทั้งเปลี่ยนแปลงจำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i) ของแต่ละขนาดความยาวอย่างสุ่ม โดยให้ผลรวมของ D_i ของกลุ่มคงที่เสมอในสัดส่วนที่สมดุลกันระหว่างกลุ่ม คือเป็น 1:1:1:1:1:1 เช่นเดียวกันกันในกลุ่มชุดทดสอบที่ 8 ถึง 12 แต่กลับเปลี่ยนค่าผลรวมของ D_i ของแต่ละกลุ่มจาก 45 ท่อน เป็น 90 ท่อนสำหรับชุดทดสอบที่ 43 ถึง 48 และเป็น 24 ท่อนสำหรับชุดทดสอบที่ 49 ถึง 54 ทำให้ผลรวมทั้งหมดของ D_i ของทุกกลุ่มช่วงมีค่าไม่เท่ากับ 270 ท่อนเช่นที่ผ่านมา แต่เท่ากับ 450 และ 144 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าเดิม และน้อยกว่าเดิม ชุดทดสอบเหล่านี้จึงมีเป้าประสงค์เพื่อเปรียบเทียบขนาดผลกระทบ เมื่อจำนวนผลรวม D_i มากหรือน้อยต่างกัน แต่อัตราส่วนของจำนวนระหว่างกลุ่มคงที่และกระจายในแต่ละกลุ่มช่วงอย่างสมดุล

ชุดทดสอบทั้ง 54 ชุดนี้ถูกออกแบบให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดท่อนความยาวที่ต้องการ (L_i) และจำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i) ตามกลุ่มช่วงขนาดความยาวต่าง ๆ ที่แบ่งไว้ทั้ง 6 กลุ่ม อย่างสุ่มในแต่ละชุดทดสอบ เพื่อให้เกิดเป็นกรณีต่าง ๆ อย่างหลากหลายและเป็นระบบ ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างกันของการกระจายและสัดส่วนการกระจายของค่าผลรวมของ D_i ระหว่างกลุ่มช่วงขนาดความยาวต่าง ๆ กัน รวมถึงขนาดท่อนความยาว (L_i) ทุกขนาดที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปเสมอ (ช่วงขนาดความยาวถูกพิจารณาแบ่งออกเป็น 6 กลุ่มช่วง แต่ละช่วงมี 3 ขนาดที่แตกต่างกัน) โดยค่าปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลกระทบจะถูกควบคุมให้คงที่เท่ากันในทุกชุดทดสอบ (เท่ากับของโจทย์ปัญหาฐาน) โดยตลอด ในแต่ละชุดทดสอบจะกำหนดให้ทำซ้ำ ๆ เดิม (ค่าที่กำหนดให้มีการสุ่มจะทำการสุ่มใหม่ทุกครั้ง) จำนวน 100 ครั้ง ผลคำตอบที่ได้ในแต่ละชุดทดสอบเหล่านี้จะถูกนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบทางสถิติเพื่อหาความเหมือนหรือความต่างกันอย่างมีนัยสำคัญต่อไป

ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ จะเป็นการเรียกโปรแกรมชุดคำสั่งอัตโนมัติที่สร้างขึ้นเอง ซึ่งจะเริ่มการทำงานจากการป้อนข้อมูลนำเข้าที่เป็นโจทย์ปัญหาที่สุ่มค่าขึ้นหรือกำหนดค่าให้ตามที่ออกแบบไว้เป็นชุดทดสอบต่าง ๆ เหล่านี้ ใส่ลงในแผ่นคำนวณที่เป็นพื้นที่ของแบบจำลองปัญหาในโปรแกรม Microsoft Excel จากนั้นจึงดำเนินการหาคำตอบที่ดีที่สุดตามหลักการที่ใช้อ้างอิง ประกอบด้วย การสร้างเซตเริ่มต้นของรูปแบบการตัดที่ประสิทธิภาพดี และการหาจำนวนการตัดซ้ำตามรูปแบบ ซึ่งจะมีการเรียกใช้โปรแกรม Solver เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วย พร้อมทั้งการบันทึกค่าคำตอบที่ได้ในแต่ละครั้ง แล้วจึงวนรอบซ้ำการทดสอบเดิมเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนครบ 100 ครั้งตามที่กำหนด โดยค่าข้อมูลนำเข้าจะมีการสุ่มค่าขึ้นใหม่แต่ละครั้ง ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ของแต่ละชุด

ทดสอบ เมื่อสิ้นสุดการทดสอบวนรอบซ้ำตามที่กำหนดจะได้ผลคำตอบที่บันทึกไว้ในแผ่นคำนวณของโปรแกรม Excel จำนวนมาก ซึ่งจะนำมาวิเคราะห์ต่อไปเพื่อสรุปผลอีกครั้ง

4.11 การวิเคราะห์ผลการทดสอบชุดที่ 2

ผลการทดสอบทั้งหมด 54 ชุดทดสอบได้แสดงไว้ในตารางข้างบนนี้ ซึ่งมีผลของค่าต่าง ๆ ที่คัดเลือกมาแสดงไว้ 3 ค่า ได้แก่ ค่าเฉลี่ยของผลรวมจำนวนวัสดุคงคลังที่ใช้ (Average Sum(X_j)), ค่าเฉลี่ยของร้อยละของเศษการตัดรวม (Average *%waste*), และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของร้อยละของเศษการตัดรวม (Standard Deviation of *%waste*) ทั้งนี้ไม่ได้นำแผนการตัดคำตอบที่ดีที่สุดจากการทดสอบแต่ละครั้งมาแสดงด้วย เนื่องจากมีข้อมูลจำนวนมาก (ประกอบด้วย เซตของรูปแบบการตัดและจำนวนครั้งการตัดซ้ำ) ข้อมูลค่าเฉลี่ยของร้อยละของเศษการตัดรวม (Average *%waste*) ถูกนำมาใช้เป็นหลักในการเปรียบเทียบและประเมินคำตอบที่ได้จากการทดสอบด้วยหลักการทางสถิติ คือการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และการวิเคราะห์ one-tailed t-Test เพื่อหาความแตกต่างระหว่างกลุ่มข้อมูลผลการทดสอบจำนวนมากกว่าหรือเท่ากับ 2 กลุ่มขึ้นไป ซึ่งจะเป็นการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis test) ที่ว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลทั้งสองหรือมากกว่าเหล่านั้นเท่ากันหรือไม่ โดยจะใช้ค่าระดับนัยสำคัญหรือค่า alpha ที่เท่ากับ 0.05 ตลอดทุกการวิเคราะห์ การวิเคราะห์ผลนี้จัดแบ่งออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ เพื่อการเปรียบเทียบค่าระหว่างกัน ผลที่ได้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สำหรับผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 1 ถึง 6 ได้ทำการจับคู่กันคราวละ 2 ชุดเพื่อทำการเปรียบเทียบกันเป็นคู่ ๆ (pairwise comparisons) รวมทั้งหมด 5 คู่ดังนี้คือ ผลของชุดการทดสอบที่ 1 กับ 2, 2 กับ 3, 3 กับ 4, 4 กับ 5 และ 5 กับ 6 รวมทั้งคู่ของ 2 กับ 6 และ 3 กับ 6 โดยทำการวิเคราะห์ด้วย one-tailed t-Test ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดการทดสอบเหล่านี้มีค่าไม่เท่ากันอย่างมีนัยยะสำคัญ ยกเว้นคู่ของชุดการทดสอบที่ 5 กับ 6 ที่มีค่าไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าเรียงจากน้อยไปมากได้ตามลำดับดังนี้คือ ค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 4 < 5 = 6 = 3 < 2 < 1 โดยที่ค่า *t Stat* และ *t Crit* ที่ได้จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบรายคู่เหล่านี้แสดงในตารางข้างล่าง นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ด้วย ANOVA สำหรับผลของชุดการทดสอบที่ 3, 5, และ 6 เพื่อยืนยันได้ว่ามีค่าไม่แตกต่างกัน

สำหรับผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 7 ถึง 12 ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วย ANOVA ซึ่งผลการวิเคราะห์แปลความหมายได้ว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดการทดสอบทั้ง 6 นี้มีค่าไม่เท่ากัน อย่างไรก็ตามค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 7 มีค่าที่แตกต่างจากชุดอื่นอย่างสังเกตได้ จึงได้นำข้อมูลของชุดการทดสอบที่ 7 ออกจากกลุ่ม แล้วจึงวิเคราะห์ซ้ำอีกครั้งกับข้อมูลที่เหลือ คราวนี้กลับพบว่าค่าเฉลี่ยจากชุดการทดสอบทั้ง 5 ชุด ได้แก่ 8, 9, 10, 11, และ 12 มีค่าเท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยกันเองระหว่างกลุ่มทั้งหมดจะพบว่า ชุดการทดสอบที่ 7 ให้ค่าที่ต่ำที่สุด ในขณะที่ชุดการทดสอบที่เหลือทั้ง 5 ชุดมีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันเอง โดยสามารถเรียงลำดับจากน้อยไปมากได้ตามลำดับดังนี้คือ ค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบ

ที่ 7 < 8 = 9 = 10 = 11 = 12 นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์แบบ pairwise comparisons ด้วย one-tailed t-Test สำหรับคู่ของผลการทดสอบที่ 7 กับ 8 และ 7 กับ 12 เพื่อยืนยันการเรียงลำดับค่าดังกล่าว

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลคำตอบจากชุดการทดสอบทั้ง 54 ชุด

%waste data from tests	Analysis method	Null hypothesis	*F or t Stat*	*p-value*	*F or t crit*	Result	Interpret		
Test 1 and 2	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	3.929	7.6E-05	1.659	Reject null	1	>	2
Test 2 and 3	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	3.818	9.0E-05	1.653	Reject null	2	>	3
Test 3 and 4	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	12.101	8.9E-26	1.653	Reject null	3	>	4
Test 4 and 5	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-5.908	1.5E-08	1.657	Reject null	4	<	5
Test 5 and 6	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-1.246	1.1E-01	1.654	Accept null	5	=	6
Test 2 and 6	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	2.558	5.7E-03	1.654	Reject null	2	>	6
Test 3 and 6	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-0.612	2.7E-01	1.653	Accept null	3	=	6
Test 3, 5, 6	ANOVA	All means are equal	1.052	3.5E-01	3.026	Accept null	All	=	
Test 7, 8, 9, 10, 11, 12	ANOVA	All means are equal	3.910	1.7E-03	2.229	Reject null	All	<>	
Test 8, 9, 10, 11, 12	ANOVA	All means are equal	0.537	7.1E-01	2.390	Accept null	All	=	
Test 7 and 8	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-3.348	5.0E-04	1.654	Reject null	7	<	8
Test 7 and 12	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-2.983	1.6E-03	1.653	Reject null	7	<	12
Test 13 and 14	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-2.868	2.3E-03	1.653	Reject null	13	<	14
Test 14 and 15	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-4.952	9.5E-07	1.655	Reject null	14	<	15
Test 15 and 16	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-3.831	8.7E-05	1.653	Reject null	15	<	16
Test 16 and 17	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-17.203	4.4E-40	1.653	Reject null	16	<	17
Test 17 and 18	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	13.830	5.6E-30	1.654	Reject null	17	>	18
Test 16 and 18	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-4.702	2.4E-06	1.653	Reject null	16	<	18
Test 19 and 20	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-5.701	3.2E-08	1.655	Reject null	19	<	20
Test 20 and 21	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-5.688	3.8E-08	1.656	Reject null	20	<	21
Test 21 and 22	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-7.046	1.7E-11	1.653	Reject null	21	<	22
Test 22 and 23	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-28.529	8.1E-68	1.654	Reject null	22	<	23
Test 23 and 24	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	23.054	1.9E-56	1.653	Reject null	23	>	24
Test 22 and 24	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-5.468	6.9E-08	1.653	Reject null	22	<	24
Test 25 and 26	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-5.659	3.6E-08	1.655	Reject null	25	<	26
Test 26 and 27	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-8.368	3.0E-14	1.656	Reject null	26	<	27
Test 27 and 28	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-10.581	8.1E-21	1.654	Reject null	27	<	28
Test 28 and 29	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-29.725	1.1E-68	1.654	Reject null	28	<	29
Test 29 and 30	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	24.377	7.7E-61	1.653	Reject null	29	>	30
Test 28 and 30	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-3.402	4.1E-04	1.653	Reject null	28	<	30
Test 31 and 32	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-5.472	7.2E-08	1.653	Reject null	31	<	32
Test 32 and 33	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-5.158	3.4E-07	1.654	Reject null	32	<	33
Test 33 and 34	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-9.605	2.7E-17	1.656	Reject null	33	<	34
Test 34 and 35	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	-25.094	1.4E-63	1.653	Reject null	34	<	35
Test 35 and 36	One tailed T-test	The 1st mean ≥ the 2nd mean	23.605	9.1E-60	1.653	Reject null	35	>	36

Test 34 and 36	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-2.804**	**2.8E-03**	**1.653**	**Reject null**	**34**	**<**	**36**
Test 37 and 38	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-2.987**	**1.6E-03**	**1.653**	**Reject null**	**37**	**<**	**38**
Test 38 and 39	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-4.777**	**1.9E-06**	**1.654**	**Reject null**	**38**	**<**	**39**
Test 39 and 40	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-8.108**	**1.5E-13**	**1.656**	**Reject null**	**39**	**<**	**40**
Test 40 and 41	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-24.893**	**5.1E-62**	**1.653**	**Reject null**	**40**	**<**	**41**
Test 41 and 42	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**23.550**	**2.3E-59**	**1.653**	**Reject null**	**41**	**>**	**42**
Test 40 and 42	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-24.893**	**5.1E-62**	**1.653**	**Reject null**	**40**	**<**	**42**
Test 8 and 13	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**8.042**	**2.1E-13**	**1.656**	**Reject null**	**8**	**>**	**13**
Test 13 and 19	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**4.760**	**2.1E-06**	**1.654**	**Reject null**	**13**	**>**	**19**
Test 19 and 25	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**0.255**	**4.0E-01**	**1.653**	**Accept null**	**19**	**=**	**25**
Test 8 and 14	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**5.951**	**8.9E-09**	**1.655**	**Reject null**	**8**	**>**	**14**
Test 14 and 20	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**1.373**	**8.6E-02**	**1.653**	**Accept null**	**14**	**=**	**20**
Test 20 and 26	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**0.061**	**4.8E-01**	**1.653**	**Accept null**	**20**	**=**	**26**
Test 8 and 15	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**0.867**	**1.9E-01**	**1.653**	**Accept null**	**8**	**=**	**15**
Test 15 and 21	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-0.448**	**3.3E-01**	**1.653**	**Accept null**	**15**	**=**	**21**
Test 21 and 27	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-2.007**	**2.3E-02**	**1.653**	**Reject null**	**21**	**<**	**27**
Test 8 and 16	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-3.056**	**1.3E-03**	**1.653**	**Reject null**	**8**	**<**	**16**
Test 16 and 22	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-3.983**	**4.8E-05**	**1.653**	**Reject null**	**16**	**<**	**22**
Test 22 and 28	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-5.246**	**2.0E-07**	**1.653**	**Reject null**	**22**	**<**	**28**
Test 8 and 17	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-20.868**	**3.6E-47**	**1.655**	**Reject null**	**8**	**<**	**17**
Test 17 and 23	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-16.019**	**1.8E-37**	**1.653**	**Reject null**	**17**	**<**	**23**
Test 23 and 29	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-9.320**	**1.5E-17**	**1.653**	**Reject null**	**23**	**<**	**29**
Test 8 and 18	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-8.492**	**2.7E-15**	**1.653**	**Reject null**	**8**	**<**	**18**
Test 18 and 24	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-5.778**	**1.6E-08**	**1.653**	**Reject null**	**18**	**<**	**24**
Test 24 and 30	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-3.350**	**4.9E-04**	**1.653**	**Reject null**	**24**	**<**	**30**
Test 19 and 31	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**0.869**	**1.9E-01**	**1.654**	**Accept null**	**19**	**=**	**31**
Test 20 and 32	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-0.101**	**4.6E-01**	**1.653**	**Accept null**	**20**	**=**	**32**
Test 21 and 33	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**1.397**	**8.2E-02**	**1.653**	**Accept null**	**21**	**=**	**33**
Test 22 and 34	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-1.933**	**2.7E-02**	**1.653**	**Reject null**	**22**	**<**	**34**
Test 23 and 35	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**2.005**	**2.3E-02**	**1.653**	**Reject null**	**23**	**>**	**35**
Test 24 and 36	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**0.138**	**4.5E-01**	**1.653**	**Accept null**	**24**	**=**	**36**
Test 19 and 37	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-3.752**	**1.4E-04**	**1.658**	**Reject null**	**19**	**<**	**37**
Test 20 and 38	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-2.507**	**6.5E-03**	**1.653**	**Reject null**	**20**	**<**	**38**
Test 21 and 39	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**0.286**	**3.9E-01**	**1.653**	**Accept null**	**21**	**=**	**39**
Test 22 and 40	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-1.712**	**4.4E-02**	**1.653**	**Reject null**	**22**	**<**	**40**
Test 23 and 41	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**2.028**	**2.2E-02**	**1.653**	**Reject null**	**23**	**>**	**41**
Test 24 and 42	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-0.039**	**4.8E-01**	**1.653**	**Accept null**	**24**	**=**	**42**
Test 31 and 37	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-3.963**	**5.7E-05**	**1.655**	**Reject null**	**31**	**<**	**37**
Test 32 and 38	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-2.322**	**1.1E-02**	**1.653**	**Reject null**	**32**	**<**	**38**
Test 33 and 39	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-1.328**	**9.3E-02**	**1.653**	**Accept null**	**33**	**=**	**39**
Test 34 and 40	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**0.117**	**4.5E-01**	**1.653**	**Accept null**	**34**	**=**	**40**
Test 35 and 41	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-0.032**	**4.9E-01**	**1.653**	**Accept null**	**35**	**=**	**41**
Test 36 and 42	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-0.170**	**4.3E-01**	**1.653**	**Accept null**	**36**	**=**	**42**
Test 43, 44, 45, 46, 47, 48	**ANOVA**	**All means are equal**	**0.362**	**8.7E-01**	**2.229**	**Accept null**	**All**	**=**	

Test 49, 50, 51, 52, 53, 54	**ANOVA**	**All means are equal**	**2.012**	**7.5E-02**	**2.229**	**Accept null**	**All**	**=**	
Test 8 and 43	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**0.601**	**2.7E-01**	**1.653**	**Accept null**	**8**	**=**	**43**
Test 43 and 51	**One tailed T-test**	**The 1st mean ≥ the 2nd mean**	**-1.064**	**1.4E-01**	**1.653**	**Accept null**	**43**	**=**	**51**
Test 43-54	**ANOVA**	**All means are equal**	**1.758**	**5.7E-02**	**1.797**	**Accept null**	**All**	**=**	

สำหรับผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 13 ถึง 18 ได้ทำการจับคู่กันคราวละ 2 ชุดเพื่อทำการเปรียบเทียบกันเป็นคู่ ๆ (pairwise comparisons) รวมทั้งหมด 6 คู่ดังนี้คือ ผลของชุดการทดสอบที่ 13 กับ 14, 14 กับ 15, 15 กับ 16, 16 กับ 17, 17 กับ 18 และ 16 กับ 18 โดยทำการวิเคราะห์ด้วย one-tailed t-Test ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดการทดสอบเหล่านี้มีค่าไม่เท่ากัน แต่มีค่าเรียงจากน้อยไปมากได้ตามลำดับดังนี้คือ ค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 13 < 14 < 15 < 16 < 18 <17 โดยที่ค่า *t Stat* และ *t Crit* ที่ได้จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบรายคู่เหล่านี้แสดงในตารางข้างบน

สำหรับผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 19 ถึง 24 ได้ทำการจับคู่แล้ววิเคราะห์เปรียบเทียบกันเป็นรายคู่เช่นเดียวกับที่ผ่านมา ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบเหล่านี้มีค่าไม่เท่ากัน แต่มีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับดังนี้คือ ค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 19 < 20 < 21 < 22 < 24 < 23

สำหรับผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 25 ถึง 30 ผลจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบเป็นรายคู่เช่นกัน ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบเหล่านี้มีค่าไม่เท่ากัน แต่มีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับดังนี้คือ ค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 25 < 26 < 27 < 28 < 30 < 29

สำหรับผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 31 ถึง 36 ผลจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบเป็นรายคู่เช่นกัน ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบเหล่านี้มีค่าไม่เท่ากัน แต่มีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับดังนี้คือ ค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 31 < 32 < 33 < 34 < 36 < 35

สำหรับผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 37 ถึง 42 ผลจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบเป็นรายคู่เช่นกัน ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบเหล่านี้มีค่าไม่เท่ากัน แต่มีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับดังนี้คือ ค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 37 < 38 < 39 < 40 < 42 < 41

นอกจากนี้ยังมีการจับคู่เพื่อการวิเคราะห์เปรียบเทียบ (pairwise comparisons) แบบข้ามกลุ่มเพื่อดูแนวโน้มของผลคำตอบ โดยได้ทำการจับคู่เปรียบเทียบกันรวม 3 คู่ดังนี้ ผลของชุดการทดสอบที่ 8 กับ 13, 13 กับ 19, และ 19 กับ 25 (พิจารณาให้ชุดการทดสอบที่ 8 เป็นชุดควบคุม) ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบเหล่านี้มีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับดังนี้คือ ค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 25 = 19 < 13 < 8 และการจับคู่เปรียบเทียบแบบข้ามกลุ่มอีก 3 คู่คือ ผลของชุดการทดสอบที่ 8 กับ 14, 14 กับ 20, และ 20 กับ 26 (ยังคงพิจารณาให้ชุดการทดสอบที่ 8 เป็นชุดควบคุม) ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบเหล่านี้มีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับดังนี้คือ ค่าเฉลี่ยของชุดการ

ทดสอบที่ 14 = 20 = 26 < 8 ซึ่งค่าทางสถิติที่ได้จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบรายคู่เหล่านี้แสดงไว้ในตารางข้างบนนี้

การจับคู่เพื่อการวิเคราะห์เปรียบเทียบ (pairwise comparisons) แบบข้ามกลุ่มเพื่อดูแนวโน้มของผลคำตอบ ยังคงดำเนินต่อไปโดยได้ทำการจับคู่เปรียบเทียบผลของชุดการทดสอบที่ 8 กับ 15, 15 กับ 21, และ 21 กับ 27 (ให้ชุดการทดสอบที่ 8 เป็นชุดควบคุม) ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับคือ 8 = 15 = 21 < 27 และการจับคู่เปรียบเทียบแบบข้ามกลุ่มอีกคือผลของชุดการทดสอบที่ 8 กับ 16, 16 กับ 22, และ 22 กับ 28 ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบเหล่านี้มีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับคือ 8 < 16 < 22 < 28 และการจับคู่เปรียบเทียบแบบข้ามกลุ่มของผลของชุดการทดสอบที่ 8 กับ 17, 17 กับ 23, และ 23 กับ 29 ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบเหล่านี้มีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับคือ 8 < 17 < 23 < 29 และสุดท้ายการจับคู่เปรียบเทียบแบบข้ามกลุ่มของผลของชุดการทดสอบที่ 8 กับ 18, 18 กับ 24, และ 24 กับ 30 ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบเหล่านี้มีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับคือ 8 < 18 < 24 < 30 ซึ่งค่าทางสถิติที่ได้จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบรายคู่เหล่านี้แสดงไว้ในตารางข้างบนนี้

ในชุดถัดไปนี้ยังคงเป็นการวิเคราะห์เปรียบเทียบด้วยการจับคู่ (pairwise comparisons) แบบข้ามกลุ่มเพื่อดูแนวโน้มของผลคำตอบ โดยได้ทำการจับคู่เปรียบเทียบระหว่าง 3 กลุ่มของผลของชุดการทดสอบดังนี้ กลุ่มของชุดการทดสอบที่ 19 ถึง 24, 31 ถึง 36, และ 37 ถึง 42 โดยแบ่งเป็น 6 กลุ่ม คราวละ 2 คู่ ไล่ไปตามลำดับดังนี้ 19 กับ 31, 31 กับ 37; 20 กับ 32, 32 กับ 38; 21 กับ 33, 33 กับ 39; 22 กับ 34, 34 กับ 40; 23 กับ 35, 35 กับ 41; 24 กับ 36, 36 กับ 42 ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับคือ 19 = 31 < 37; 20 = 32 < 38; 21 = 33 = 39; 22 < 34 = 40; 41 = 35 < 23; และ 42 = 36 = 24

สำหรับผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 43 ถึง 48 ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วย ANOVA ซึ่งผลการวิเคราะห์แปลความหมายได้ว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดการทดสอบทั้ง 6 นี้มีค่าเท่ากัน จากนั้นผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 49 ถึง 54 ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วย ANOVA เช่นกันซึ่งผลการวิเคราะห์แปลความหมายได้ว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดการทดสอบทั้ง 6 นี้ก็มีค่าเท่ากันด้วย และเมื่อนำชุดการทดสอบทั้ง 12 ตั้งแต่ชุดที่ 43 ถึง 54 ชุดมาวิเคราะห์ด้วย ANOVA ก็ยังได้ข้อสรุปว่าค่าเฉลี่ยจากชุดการทดสอบทั้ง 12 นี้มีค่าเท่ากัน นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์แบบ pairwise comparisons ด้วย one-tailed t-Test สำหรับคู่ของผลการทดสอบที่ 8 กับ 43 และ 43 กับ 51 เพื่อยืนยันให้เห็นชัดเจนว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดการทดสอบที่ 8 (พิจารณาให้ชุดการทดสอบที่ 8 เป็นชุดควบคุม) กับชุดการทดสอบทั้ง 12 นี้มีค่าเท่ากัน

ข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวสำหรับค่าตัวแปรขนาดความยาวของท่อนความต้องการ (L_i) และจำนวนความต้องการของแต่ละขนาดความยาว (D_i) มีดังต่อไปนี้

การเปลี่ยนแปลงของ L_i แบบคราวละหนึ่งกลุ่มช่วงเท่านั้น ในกลุ่มช่วงความยาว G1 จะส่งผลอย่างมากต่อ *%waste* โดยทำให้เกิดเศษการตัดมากขึ้น ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของ L_i ในกลุ่มช่วงความยาว G4 ก็ส่งผลอย่างมากต่อ %waste แต่ทำให้เกิดเศษการตัดน้อยลง

การเปลี่ยนแปลงของ L_i และ D_i แบบพร้อม ๆ กันทุกกลุ่มช่วง โดยสัดส่วนการกระจายของ D_i อย่างสม่ำเสมอ (uniform distribution) จะส่งผลไปในทางที่ทำให้ *%waste* มากขึ้นกว่าการเปลี่ยนแปลงของ L_i แบบคราวละหนึ่งกลุ่มช่วง และมากขึ้นกว่าการไม่เปลี่ยนแปลงของ D_i โดยผลลัพธ์ของการเปลี่ยนแปลงพร้อมกันของทั้งสองตัวแปรนี้มีความสม่ำเสมอในการทดสอบซ้ำ ๆ หลายครั้ง

การเปลี่ยนแปลงของ L_i และ D_i แบบพร้อม ๆ กันทุกกลุ่มช่วง โดยสัดส่วนการกระจายของ D_i เป็นแบบไม่สม่ำเสมอ (unbalanced distribution) จะส่งผลไปในทางที่ทำให้ *%waste* น้อยลงกว่าแบบสม่ำเสมอ (uniform distribution) หากจำนวน D_i ของ G1 หรือ G2 มีค่ามากกว่ากลุ่มอื่น ๆ และจะยิ่งน้อยลงอีกหากจำนวน D_i ของ G1 หรือ G2 ยิ่งมีสัดส่วนที่มากกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น ๆ ดังนี้คือ *%waste* ของชุดทดสอบที่มีจำนวน D_i ของ G1 หรือ G2 เมื่อเทียบกับของกลุ่มอื่น ๆ เป็นสัดส่วน 6.25:1:1:1:1:1 จะน้อยกว่าที่สัดส่วน 4:1:1:1:1:1 และน้อยกว่าที่สัดส่วน 2.5:1:1:1:1:1

ในทางกลับกันหากเป็นจำนวน D_i ของ G3, G4, G5, หรือ G6 ที่มีค่ามากกว่ากลุ่มอื่น ๆ กลับส่งผลที่ทำให้ *%waste* มากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มขึ้นของ D_i ของ G5 จะทำให้ *%waste* มากขึ้นอย่างมากที่สุด และจะยิ่งมากขึ้นอีกหากจำนวน D_i ของ G3, G4, G5, หรือ G6 ยิ่งมีสัดส่วนที่มากกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น ๆ ดังนี้คือ *%waste* ของชุดทดสอบที่มีจำนวน D_i ของ G3 (ในทำนองเดียวกันกับ G4, G5, หรือ G6) เมื่อเทียบกับของกลุ่มอื่น ๆ เป็นสัดส่วน 1:1:6.25:1:1:1 จะมากกว่าที่สัดส่วน 1:1:4:1:1:1 และมากว่าที่สัดส่วน 1:1:2.5:1:1:1

แต่หากพิจารณาในชุดทดสอบที่มี D_i เป็นสัดส่วนเมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น ๆ ที่ 4:1:1:1:1:1 เหมือนกัน จะพบว่าแม้มีผลรวมจำนวน D_i มากหรือน้อยก็จะทำให้เกิด *%waste* ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังนี้คือ *%waste* ของชุดทดสอบที่มีจำนวน D_i ของ G1 (ในทำนองเดียวกันกับ G2, G3, G4, G5, หรือ G6) เมื่อเทียบกับของกลุ่มอื่น ๆ เป็นสัดส่วน 4:1:1:1:1:1 เหมือนกัน เช่น 80:20:20:20:20:20, 120:30:30:30:30:30, และ 160:40:40:40:40:40 จะมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน ดังนั้นสัดส่วนของจำนวน D_i เมื่อเทียบกับกลุ่มจึงมีความสัมพันธ์กับปริมาณการเกิด *%waste*

การเปลี่ยนแปลงของ L_i และ D_i แบบพร้อม ๆ กันทุกกลุ่มช่วง โดยสัดส่วนการกระจายของ D_i เป็นแบบสม่ำเสมอ (uniform distribution) เท่ากัน แม้ว่าจะมีจำนวน D_i ต่างกันในแต่ละกรณี เช่น 45:45:45:45:45:45, 90:90:90:90:90:90, และ 24:24:24:24:24:24 ก็จะไม่ส่งผลทำให้ *%waste* ต่างกัน ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าสัดส่วนการกระจายของ D_i ระหว่างกลุ่มช่วงส่งผลต่อ *%waste* เท่านั้น แต่ตัวจำนวนของ D_i กลับไม่ส่งผลต่อ *%waste*

หากพิจารณาถึงปัจจัยสัดส่วน (proportion) ของจำนวนท่อนที่ต้องการที่มีผลต่อปริมาณเศษการตัดรวม จะได้ว่าหากจำนวนท่อนที่ต้องการของกลุ่มช่วงความยาวขนาดสั้น (กลุ่มช่วงขนาดที่ 1 และ 2) มีสัดส่วนที่มากกว่าจะช่วยให้ปริมาณเศษการตัดรวมลดลงได้ แต่ในทางกลับกัน หากจำนวนท่อนที่ต้องการของกลุ่มช่วงความยาวขนาดยาว (กลุ่มช่วงขนาดที่ 5 และ 6) มีสัดส่วนที่มากกว่าจะทำให้ปริมาณเศษการตัดรวมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สัดส่วนที่มากกว่าของกลุ่มช่วงขนาดที่ 5 จะส่งผลต่อการทำให้ปริมาณเศษเพิ่มขึ้นในอัตราที่มากกว่าของกลุ่มช่วงขนาดที่ 6 และยิ่งมีดีกรีความไม่สม่ำเสมอของสัดส่วนยิ่งมาก จะยิ่งทำให้อัตราการเพิ่มของปริมาณเศษยิ่งเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

4.12 แบบแผนการทดสอบชุดที่ 3

แบบแผนการทดสอบชุดที่ 3 สร้างขึ้นเพื่อเป็นการทดสอบกับตัวแปรสำคัญที่กำหนดลักษณะคละของโจทย์ปัญหา คือ จำนวนขนาดท่อนความยาวที่ต่างกัน (m) โดยกำหนดให้ปรับเปลี่ยนค่าจำนวนขนาดท่อนความยาวที่ต่างกัน (m) พร้อมทั้งขนาดความยาวของท่อนความต้องการ (L_i) อย่างเป็นระบบ ซึ่งขนาดความยาวที่ต้องการเหล่านี้ยังคงถูกจัดแบ่งเป็นกลุ่ม ๆ เช่นเดิมตามช่วงขนาดความยาว กลุ่มละ 3 ขนาด รวมจำนวน 6 กลุ่ม ทั้งนี้เพื่อควบคุมปัจจัยที่อาจส่งผลต่อผลการทดสอบ และเพื่อให้เห็นผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปร m และ L_i ของโจทย์ทดสอบที่มีต่อร้อยละของเศษการตัดที่เกิดขึ้น (%waste) โดยที่การปรับเปลี่ยนค่า m สามารถทำได้ผ่านการกำหนดค่า D_i กล่าวคือหากกำหนดให้ค่า D_i ใด ๆ เท่ากับศูนย์ ก็มีความหมายเท่ากับการลดจำนวนขนาดท่อนความยาวที่ต่างกัน (m) ลงหนึ่งขนาดนั่นเอง ตัวอย่างเช่น ในโจทย์ปัญหาฐานหากให้ $D_1 = 0$ หมายถึงให้ขนาดความยาว $L_1 = 0.24$ เมตร ไม่มีความต้องการเลยสักท่อน จึงทำให้ค่า m ลดลงจาก 18 เป็น 17 ขนาด

ชุดการทดสอบมีจำนวนทั้งหมด 35 ชุด แต่ละชุดจะถูกทดสอบซ้ำ ๆ เป็นจำนวน 100 ครั้ง เพื่อให้มีข้อมูลผลการทดสอบจำนวนมากเพียงพอต่อการวิเคราะห์ทางสถิติและสร้างบทสรุปทั่วไปได้ รายละเอียดของชุดการทดสอบทั้งหมด พร้อมทั้งค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลการปรับเปลี่ยนค่า L_i และ D_i (ซึ่งส่งผลต่อค่า m) ของโจทย์ปัญหาและค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบทั้ง 35 ชุด

Test	Treatments:											Results:		
						Total of Di of Group#						Average	Average	S.D. of
no.	Variations of *Li* and *Di*				*m*	1	2	3	4	5	6	Sum*Xj*	*%waste*	*%waste*
base	Fix Li	All G	Fix Di	All G	18	45	45	45	45	45	45	108	2.61	n.a.
1	Fix Li	All G	Zero D1-D3	G1	15	0	45	45	45	45	45	107.7	4.31	0.88
2	Fix Li	All G	Zero D4-D6	G2	15	45	0	45	45	45	45	105.6	6.45	1.38
3	Fix Li	All G	Zero D7-D9	G3	15	45	45	0	45	45	45	99.4	6.57	2.78

4	**Fix Li**	**All G**	**Zero D10-D12**	**G4**	**15**	**45**	**45**	**45**	**0**	**45**	**45**	**90.4**	**5.17**	**1.98**
5	**Fix Li**	**All G**	**Zero D13-15**	**G5**	**15**	**45**	**45**	**45**	**45**	**0**	**45**	**82.5**	**2.26**	**0.55**
6	**Fix Li**	**All G**	**Zero D16-18**	**G6**	**15**	**45**	**45**	**45**	**45**	**45**	**0**	**67.7**	**1.78**	**0.55**
7	**Fix Li**	**All G**	**Zero D1-6**	**G1,2**	**12**	**0**	**0**	**45**	**45**	**45**	**45**	**105.7**	**9.45**	**1.61**
8	**Fix Li**	**All G**	**Zero D7-12**	**G3,4**	**12**	**45**	**45**	**0**	**0**	**45**	**45**	**90.0**	**23.18**	**2.77**
9	**Fix Li**	**All G**	**Zero D13-18**	**G5,6**	**12**	**45**	**45**	**45**	**45**	**0**	**0**	**42.2**	**1.55**	**0.78**
10	**Fix Li**	**All G**	**Zero D1-9**	**G1-3**	**9**	**0**	**0**	**0**	**45**	**45**	**45**	**98.1**	**16.77**	**3.10**
11	**Fix Li**	**All G**	**Zero D10-18**	**G4-6**	**9**	**45**	**45**	**45**	**0**	**0**	**0**	**22.3**	**2.67**	**1.51**
12	**Fix Li**	**All G**	**Zero D1,4,7,10,13,16**		**12**	**30**	**30**	**30**	**30**	**30**	**30**	**76.4**	**3.31**	**0.58**
13	**Fix Li**	**All G**	**Zero D2,5,8,11,14,17**		**12**	**30**	**30**	**30**	**30**	**30**	**30**	**73.7**	**3.74**	**0.83**
14	**Fix Li**	**All G**	**Zero D3,6,9,12,15,18**		**12**	**30**	**30**	**30**	**30**	**30**	**30**	**68.6**	**4.37**	**1.32**
15	**Fix Li**	**All G**	**Zero D1,2,4,5,7,8,10,11,13,14,16,17**		**6**	**15**	**15**	**15**	**15**	**15**	**15**	**42.0**	**6.26**	**0.00**
16	**Fix Li**	**All G**	**Zero D1,3,4,6,7,9,10,12,13,15,16,18**		**6**	**15**	**15**	**15**	**15**	**15**	**15**	**36.0**	**4.80**	**0.00**
17	**Fix Li**	**All G**	**Zero D2,3,5,6,8,9,11,12,14,15,17,18**		**6**	**15**	**15**	**15**	**15**	**15**	**15**	**34.0**	**8.35**	**0.00**
18	**Vary Li**	**All G**	**Fix Di**	**All G**	**18**	**45**	**45**	**45**	**45**	**45**	**45**	**109.5**	**3.21**	**1.73**
19	**Vary Li**	**All G**	**Zero D1**	**G2**	**15**	**0**	**45**	**45**	**45**	**45**	**45**	**109.9**	**5.70**	**2.07**
20	**Vary Li**	**All G**	**Zero D2**	**G2**	**15**	**45**	**0**	**45**	**45**	**45**	**45**	**108.4**	**7.98**	**3.58**
21	**Vary Li**	**All G**	**Zero D3**	**G3**	**15**	**45**	**45**	**0**	**45**	**45**	**45**	**104.8**	**10.08**	**5.42**
22	**Vary Li**	**All G**	**Zero D4**	**G4**	**15**	**45**	**45**	**45**	**0**	**45**	**45**	**91.8**	**5.30**	**2.41**
23	**Vary Li**	**All G**	**Zero D5**	**G5**	**15**	**45**	**45**	**45**	**45**	**0**	**45**	**80.8**	**2.73**	**1.42**
24	**Vary Li**	**All G**	**Zero D6**	**G6**	**15**	**45**	**45**	**45**	**45**	**45**	**0**	**69.1**	**1.94**	**1.19**
25	**Vary Li**	**All G**	**Zero D1-6**	**G1,2**	**12**	**0**	**0**	**45**	**45**	**45**	**45**	**106.8**	**10.65**	**3.44**
26	**Vary Li**	**All G**	**Zero D7-12**	**G3,4**	**12**	**45**	**45**	**0**	**0**	**45**	**45**	**89.9**	**18.89**	**4.93**
27	**Vary Li**	**All G**	**Zero D13-18**	**G5,6**	**12**	**45**	**45**	**45**	**45**	**0**	**0**	**40.9**	**1.54**	**0.84**
28	**Vary Li**	**All G**	**Zero D1-9**	**G1-3**	**9**	**0**	**0**	**0**	**45**	**45**	**45**	**102.3**	**19.80**	**6.82**
29	**Vary Li**	**All G**	**Zero D10-18**	**G4-6**	**9**	**45**	**45**	**45**	**0**	**0**	**0**	**22.2**	**2.81**	**1.88**
30	**Vary Li**	**All G**	**Zero D1,4,7,10,13,16**		**12**	**30**	**30**	**30**	**30**	**30**	**30**	**78.1**	**4.49**	**2.04**
31	**Vary Li**	**All G**	**Zero D2,5,8,11,14,17**		**12**	**30**	**30**	**30**	**30**	**30**	**30**	**73.5**	**4.52**	**2.24**
32	**Vary Li**	**All G**	**Zero D3,6,9,12,15,18**		**12**	**30**	**30**	**30**	**30**	**30**	**30**	**70.2**	**5.41**	**3.18**
33	**Vary Li**	**All G**	**Zero D1,2,4,5,7,8,10,11,13,14,16,17**		**6**	**15**	**15**	**15**	**15**	**15**	**15**	**40.8**	**6.08**	**9.79**
34	**Vary Li**	**All G**	**Zero D1,3,4,6,7,9,10,12,13,15,16,18**		**6**	**15**	**15**	**15**	**15**	**15**	**15**	**37.9**	**7.04**	**3.26**
35	**Vary Li**	**All G**	**Zero D2,3,5,6,8,9,11,12,14,15,17,18**		**6**	**15**	**15**	**15**	**15**	**15**	**15**	**34.1**	**7.83**	**4.46**

แบบแผนการทดสอบชุดที่ 3 นี้มีจำนวนชุดทดสอบทั้งสิ้น 35 ชุด โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลัก คือ กลุ่มการทดสอบที่กำหนดให้ทุกค่า L_i คงที่เท่ากับของโจทย์ปัญหาฐานเสมอ (หรือ Fix Li + All G) และอีกกลุ่มการทดสอบที่กำหนดให้ทุกค่า L_i เปลี่ยนแปลงแบบสุ่มเสมอภายในช่วงความยาวตามขนาดของกลุ่มช่วงทุกครั้งของการทดสอบ (หรือ Vary Li + All G) จากนั้นชุดทดสอบต่าง ๆ ในกลุ่มทั้งสองนี้จะมีการปรับเปลี่ยนค่า m อย่างเป็นระบบไปต่าง ๆ กัน ในลักษณะเหมือนกันทั้งสองกลุ่ม มีรายละเอียดดังนี้

สำหรับชุดทดสอบที่ 1 ถึง 6 ได้ถูกกำหนดให้ D_i ของกลุ่มช่วงต่าง ๆ มีค่าเท่ากับศูนย์ทีละกลุ่มช่วงตามลำดับจนครบทั้ง 6 กลุ่มช่วง โดยในหนึ่งกลุ่มช่วงจะมีขนาดท่อนความยาวต่างกัน 3 ขนาด ทำให้เสมือนกับมีค่า m เหลือเท่ากับ 15 ขนาด นอกจากนี้ยังมีการสุ่มเปลี่ยนแปลงค่า D_i ของกลุ่มช่วงต่าง ๆ ที่เหลือที่ไม่เท่ากับศูนย์ด้วย ไปในทุก ๆ ครั้งของการทดสอบ โดยกำหนดให้ผลรวมของ D_i ของกลุ่มคงที่เสมอเท่ากับ 45 ท่อน และค่า L_i จะกำหนดให้คงที่เท่ากับของโจทย์ปัญหาฐานเสมอ ซึ่งในแต่ละชุดทดสอบจะถูกทดสอบซ้ำเป็นจำนวน 100 ครั้ง ชุดทดสอบที่ 1 ถึง 6 นี้มีเป้าประสงค์เพื่อหาผลกระทบของการขาดแคลนของขนาดความยาวของกลุ่มช่วงหนึ่ง ๆ ทีละกลุ่มช่วงตามลำดับ โดยเสมือนในแต่ละชุดทดสอบจะมีขนาดความยาวเหลือเพียง 5 กลุ่มช่วง และ m = 15 เท่านั้น ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบจำกัดวงแคบ (local demand variation) ไว้ที่เพียงคราวละหนึ่งกลุ่มช่วงความยาว

สำหรับชุดทดสอบที่ 7 ถึง 9 เป็นการขยายวงการเปลี่ยนแปลงไปเป็นคราวละ 2 กลุ่มช่วงความยาว โดยกำหนดให้ D_i ของ 2 กลุ่มช่วงต่าง ๆ ที่ติดกันมีค่าเท่ากับศูนย์ ตามลำดับจนครบทั้ง 6 กลุ่มช่วง จึงเสมือนกับว่าในแต่ละชุดทดสอบจะมีค่า m เหลือเท่ากับ 12 ขนาดเท่านั้น และให้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่า D_i ของกลุ่มช่วงต่าง ๆ ที่เหลือที่ไม่เท่ากับศูนย์ และการคงที่ค่า L_i เหมือนกับกรณีทดสอบที่แล้ว ชุดทดสอบที่ 7 ถึง 9 นี้มีเป้าประสงค์เพื่อหาผลกระทบของการขาดแคลนของขนาดความยาวคราวละ 2 กลุ่มช่วงตามลำดับ โดยเสมือนในแต่ละชุดทดสอบจะมีขนาดความยาวเหลือเพียง 4 กลุ่มช่วง และ m = 12 เท่านั้น ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบขยายวงกว่าแบบในกรณีแรก

สำหรับชุดทดสอบที่ 10 และ 11 เป็นการขยายวงการเปลี่ยนแปลงไปเป็นคราวละ 3 กลุ่มช่วงความยาว โดยกำหนดให้ D_i ของ 3 กลุ่มช่วงต่าง ๆ ที่ติดกันมีค่าเท่ากับศูนย์ ตามลำดับจนครบทั้ง 6 กลุ่มช่วง จึงเสมือนกับว่าในแต่ละชุดทดสอบจะมีค่า m เหลือเท่ากับ 9 ขนาดเท่านั้น และให้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่า D_i ของกลุ่มช่วงต่าง ๆ ที่เหลือที่ไม่เท่ากับศูนย์ (จะมีขนาดความยาวเหลือเพียง 3 กลุ่มช่วง) และการคงที่ค่า L_i เหมือนกับกรณีทดสอบที่ผ่านมา ชุดทดสอบที่ 10 ถึง 11 นี้มีเป้าประสงค์เพื่อหาผลกระทบของการขาดแคลนของขนาดความยาวที่ขยายวงกว้างกว่าแบบในสองกรณีแรก

สำหรับชุดทดสอบที่ 12 ถึง 17 ได้ถูกกำหนดให้บาง D_i ของแต่ละกลุ่มช่วงต่าง ๆ มีค่าเท่ากับศูนย์พร้อมกันทั้ง 6 กลุ่มช่วง โดยในหนึ่งกลุ่มช่วงจะมีขนาดท่อนความยาวต่างกัน 3 ขนาดและจะมี D_i เพียง 1 หรือ 2 ตัวเท่านั้นที่ให้เท่ากับศูนย์ ทำให้เสมือนกับมีค่า m เหลือเท่ากับ 12 ขนาด และ 6 ขนาดตามลำดับ นอกจากนี้ยังคงมีการสุ่มเปลี่ยนแปลงค่า D_i ของกลุ่มช่วงต่าง ๆ ที่เหลือที่ไม่เท่ากับศูนย์ด้วยไปในทุก ๆ ครั้งของการทดสอบ และค่า L_i ยังคงถูกกำหนดให้คงที่เท่ากับของโจทย์ปัญหาฐานเสมอ ชุดทดสอบที่ 12 ถึง 17 นี้มีเป้าประสงค์เพื่อหาผลกระทบของการขาดแคลนของขนาดความยาวพร้อมกันในทุก ๆ กลุ่มช่วง ทำให้โจทย์ยังคงมีขนาดความยาวที่ต้องการกระจายอยู่ทุกกลุ่มช่วงขนาด แต่กลับมีจำนวน m ที่ลดลง หรือครอบคลุมแต่ไม่หลากหลาย ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของค่า m ในลักษณะที่ต่างออกไปจากเดิม

ชุดทดสอบที่ 18 ได้กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงค่า L_i ทุกค่าพร้อมกันแบบสุ่มภายในช่วงความยาวตามขนาดของกลุ่มช่วงทุกครั้งของการทดสอบ และกำหนดให้ทุก ๆ ค่า D_i คงที่เท่ากับ 15 เสมอ ชุดทดสอบนี้จะคล้ายกับโจทย์ปัญหาฐานที่เพิ่มเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่า L_i และจะนำใช้เป็นชุดทดสอบอ้างอิงสำหรับกลุ่มการทดสอบที่จะกล่าวต่อไปนี้

สำหรับชุดทดสอบที่ 19 ถึง 24 กำหนดให้ D_i ของกลุ่มช่วงต่าง ๆ มีค่าเท่ากับศูนย์ทีละกลุ่มช่วงตามลำดับจนครบทั้ง 6 กลุ่มช่วง โดยในหนึ่งกลุ่มช่วงจะมีขนาดท่อนความยาวต่างกัน 3 ขนาด ทำให้เสมือนกับมีค่า m เหลือเท่ากับ 15 ขนาด นอกจากนี้ยังมีการสุ่มเปลี่ยนแปลงค่า D_i ของกลุ่มช่วงต่าง ๆ ที่เหลือที่ไม่เท่ากับศูนย์ด้วย ไปในทุก ๆ ครั้งของการทดสอบ โดยกำหนดให้ผลรวมของ D_i ของกลุ่มคงที่เสมอเท่ากับ 45 ท่อน และค่า L_i ทุกค่าจะกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มทุกครั้งเช่นเดียวกับในชุดทดสอบที่ 18 ซึ่งในแต่ละชุดทดสอบจะถูกทดสอบซ้ำเป็นจำนวน 100 ครั้ง ชุดทดสอบที่ 19 ถึง 24 นี้มีเป้าประสงค์เพื่อหาผลกระทบของการขาดแคลนของขนาดความยาวของกลุ่มช่วงหนึ่ง ๆ ทีละกลุ่มช่วงตามลำดับ โดยเสมือนในแต่ละชุดทดสอบจะมีขนาดความยาวเหลือเพียง 5 กลุ่มช่วง และ m = 15 เท่านั้น ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบจำกัดวงแคบ (local demand variation) ไว้ที่เพียงคราวละหนึ่งกลุ่มช่วงความยาว

สำหรับชุดทดสอบที่ 25 ถึง 27 เป็นการขยายวงการเปลี่ยนแปลงไปเป็นคราวละ 2 กลุ่มช่วงความยาว โดยกำหนดให้ D_i ของ 2 กลุ่มช่วงต่าง ๆ ที่ติดกันมีค่าเท่ากับศูนย์ ตามลำดับจนครบทั้ง 6 กลุ่มช่วง จึงเสมือนกับว่าในแต่ละชุดทดสอบจะมีค่า m เหลือเท่ากับ 12 ขนาดเท่านั้น และให้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่า D_i ของกลุ่มช่วงต่าง ๆ ที่เหลือที่ไม่เท่ากับศูนย์ และการเปลี่ยนแปลงค่า L_i ทุกค่าแบบสุ่มทุกครั้งเหมือนกับกรณีทดสอบที่แล้ว ชุดทดสอบที่ 25 ถึง 27 นี้มีเป้าประสงค์เพื่อหาผลกระทบของการขาดแคลนของขนาดความยาวคราวละ 2 กลุ่มช่วงตามลำดับ โดยเสมือนในแต่ละชุดทดสอบจะมีขนาดความยาวเหลือเพียง 4 กลุ่มช่วง และ m = 12 เท่านั้น ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบขยายวงกว่าแบบในกรณีที่ผ่านมา

สำหรับชุดทดสอบที่ 28 และ 29 เป็นการขยายวงการเปลี่ยนแปลงไปเป็นคราวละ 3 กลุ่มช่วงความยาว โดยกำหนดให้ D_i ของ 3 กลุ่มช่วงต่าง ๆ ที่ติดกันมีค่าเท่ากับศูนย์ ตามลำดับจนครบทั้ง 6 กลุ่มช่วง จึงเสมือนกับว่าในแต่ละชุดทดสอบจะมีค่า m เหลือเท่ากับ 9 ขนาดเท่านั้น และให้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่า D_i ของกลุ่มช่วงต่าง ๆ ที่เหลือที่ไม่เท่ากับศูนย์ (จะมีขนาดความยาวเหลือเพียง 3 กลุ่มช่วง) และการเปลี่ยนแปลงค่า L_i ยังคงเหมือนกับกรณีทดสอบที่ผ่านมา ชุดทดสอบที่ 28 ถึง 29 นี้มีเป้าประสงค์เพื่อหาผลกระทบของการขาดแคลนของขนาดความยาวที่ขยายวงกว้างกว่าแบบในสองกรณีที่แล้ว

สำหรับชุดทดสอบที่ 30 ถึง 35 ได้ถูกกำหนดให้บาง D_i ของแต่ละกลุ่มช่วงต่าง ๆ มีค่าเท่ากับศูนย์พร้อมกันทั้ง 6 กลุ่มช่วง โดยในหนึ่งกลุ่มช่วงจะมีขนาดท่อนความยาวต่างกัน 3 ขนาดและจะมี D_i

เพียง 1 หรือ 2 ตัวเท่านั้นที่ให้เท่ากับศูนย์ ทำให้เสมือนกับมีค่า m เหลือเท่ากับ 12 ขนาด และ 6 ขนาด ตามลำดับ นอกจากนี้ยังคงมีการสุ่มเปลี่ยนแปลงค่า D_i ของกลุ่มช่วงต่าง ๆ ที่เหลือที่ไม่เท่ากับศูนย์ด้วยไปในทุก ๆ ครั้งของการทดสอบ และค่า L_i ยังคงถูกกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มเสมอทุกครั้งเช่นกรณีทดสอบที่แล้ว ชุดทดสอบที่ 30 ถึง 35 มีเป้าประสงค์เพื่อหาผลกระทบของการขาดแคลนของขนาดความยาวพร้อมกันในทุก ๆ กลุ่มช่วง ทำให้โจทย์ยังคงมีขนาดความยาวที่ต้องการกระจายอยู่ทุกกลุ่มช่วงขนาด แต่กลับมีจำนวน m ที่ลดลง หรือครอบคลุมแต่ไม่หลากหลาย ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของค่า m ในลักษณะที่ต่างออกไปจากเดิม

ชุดทดสอบทั้ง 35 ชุดนี้ถูกออกแบบให้มีสองกลุ่มหลัก คือกลุ่มที่ไม่มีและกลุ่มที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดท่อนความยาวที่ต้องการ (L_i) โดยที่จำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i) ตามกลุ่มช่วงขนาดความยาวต่าง ๆ ที่แบ่งไว้ทั้ง 6 กลุ่ม ก็จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ในบางค่าผลัดเปลี่ยนกันไปอย่างเป็นระบบ และ D_i ที่ไม่ได้กำหนดให้เท่ากับศูนย์ก็จะกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างสุ่มโดยที่ควบคุมผลรวมของแต่ละกลุ่มช่วงไว้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดเป็นกรณีต่าง ๆ อย่างหลากหลายและเป็นระบบ ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างกันของจำนวนขนาดท่อนความยาวที่ต่างกัน (m) ที่มีขนาดความยาวท่อนในบางกลุ่มช่วงต่าง ๆ กันขาดหายไปแบบแตกต่างกัน โดยค่าปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลกระทบจะถูกควบคุมให้คงที่เท่ากันในทุกชุดทดสอบ (เท่ากับของโจทย์ปัญหาฐาน) โดยตลอด ในแต่ละชุดทดสอบจะกำหนดให้ทำซ้ำ ๆ เดิม (ค่าที่กำหนดให้มีการสุ่มจะทำการสุ่มใหม่ทุกครั้ง) จำนวน 100 ครั้ง ผลคำตอบที่ได้ในแต่ละชุดทดสอบเหล่านี้จะถูกนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบทางสถิติเพื่อหาความเหมือนหรือความต่างกันอย่างมีนัยสำคัญต่อไป

ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ จะเป็นการเรียกโปรแกรมชุดคำสั่งอัตโนมัติที่สร้างขึ้นเอง ซึ่งจะเริ่มการทำงานจากการป้อนข้อมูลนำเข้าที่เป็นโจทย์ปัญหาที่สุ่มค่าขึ้นหรือกำหนดค่าให้ตามที่ออกแบบไว้เป็นชุดทดสอบต่าง ๆ เหล่านี้ ใส่ลงในแผ่นคำนวณที่เป็นพื้นที่ของแบบจำลองปัญหาในโปรแกรม Microsoft Excel จากนั้นจึงดำเนินการหาคำตอบที่ดีที่สุดตามหลักการที่ใช้อ้างอิง ประกอบด้วย การสร้างเซตเริ่มต้นของรูปแบบการตัดที่ประสิทธิภาพดี และการหาจำนวนการตัดซ้ำตามรูปแบบ ซึ่งจะมีการเรียกใช้โปรแกรม Solver เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วย พร้อมทั้งการบันทึกค่าคำตอบที่ได้ในแต่ละครั้ง แล้วจึงวนรอบซ้ำการทดสอบเดิมเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนครบ 100 ครั้งตามที่กำหนด โดยค่าข้อมูลนำเข้าจะมีการสุ่มค่าขึ้นใหม่แต่ละครั้ง ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ของแต่ละชุดทดสอบ เมื่อสิ้นสุดการทดสอบวนรอบซ้ำตามที่กำหนดจะได้ผลคำตอบที่บันทึกไว้ในแผ่นคำนวณของโปรแกรม Excel จำนวนมาก ซึ่งจะนำมาวิเคราะห์ต่อไปเพื่อสรุปผลอีกครั้ง

4.13 การวิเคราะห์ผลการทดสอบชุดที่ 3

ผลการทดสอบทั้งหมด 35 ชุดทดสอบได้แสดงไว้ในตารางข้างบนนี้ ซึ่งมีผลของค่าต่าง ๆ ที่คัดเลือกมาแสดงไว้ 3 ค่า ได้แก่ ค่าเฉลี่ยของผลรวมจำนวนวัสดุคงคลังที่ใช้ (Average Sum(X_j)), ค่าเฉลี่ยของร้อยละของเศษการตัดรวม (Average *%waste*), และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของร้อยละของเศษการตัดรวม (Standard Deviation of *%waste*) ทั้งนี้ไม่ได้นำแผนการตัดคำตอบที่ดีที่สุดจากการทดสอบแต่ละครั้งมาแสดงด้วย เนื่องจากมีข้อมูลจำนวนมาก (ประกอบด้วย เซตของรูปแบบการตัดและจำนวนครั้งการตัดซ้ำ) ข้อมูลค่าเฉลี่ยของร้อยละของเศษการตัดรวม (Average *%waste*) ถูกนำมาใช้เป็นหลักในการเปรียบเทียบและประเมินคำตอบที่ได้จากการทดสอบด้วยหลักการทางสถิติ คือการวิเคราะห์ one-tailed t-Test เพื่อหาความแตกต่างระหว่างกลุ่มข้อมูลผลการทดสอบจำนวน 2 กลุ่ม ซึ่งจะเป็นการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis test) ที่ว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลทั้งสองมากกว่าหรือเท่ากับกันหรือไม่ โดยจะใช้ค่าระดับนัยสำคัญหรือค่า alpha ที่เท่ากับ 0.05 ตลอดทุกการวิเคราะห์ การวิเคราะห์ผลนี้จัดแบ่งออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ เพื่อการเปรียบเทียบค่าระหว่างกันตามแต่ละกรณีทดสอบ ผลที่ได้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สำหรับผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 1 ถึง 6 ได้ทำการจับคู่กันคราวละ 2 ชุดเพื่อทำการเปรียบเทียบกันเป็นคู่ ๆ (pairwise comparisons) รวมทั้งหมด 5 คู่ดังนี้คือ ผลของชุดการทดสอบที่ 1 กับ 2, 2 กับ 3, 3 กับ 4, 4 กับ 5 และ 5 กับ 6 ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดการทดสอบเหล่านี้มีค่าไม่เท่ากันอย่างมีนัยยะสำคัญ ยกเว้นคู่ของชุดการทดสอบที่ 2 กับ 3 ที่มีค่าไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าเรียงจากน้อยไปมากได้ตามลำดับดังนี้คือ ค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 6 < 5 < 1 < 4 < 2 = 3 โดยที่ค่า *t Stat* และ *t Crit* ที่ได้จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบรายคู่เหล่านี้แสดงในตารางข้างล่าง

สำหรับการวิเคราะห์แบบ pairwise comparisons ของผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 7 ถึง 9 แปลความหมายได้ว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดการทดสอบทั้ง 3 นี้มีค่าไม่เท่ากัน โดยมีค่าเรียงจากน้อยไปมากได้ตามลำดับดังนี้คือ ค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 9 < 7 < 8 และการวิเคราะห์แบบ pairwise comparisons ของผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 10 และ 11 แปลความหมายได้ว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดการทดสอบทั้ง 2 นี้มีค่าไม่เท่ากัน โดยมีค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 11 < 10

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลคำตอบจากชุดการทดสอบทั้ง 35 ชุด

%waste data from tests	Analysis method	Null hypothesis	*t Stat*	*p-value*	*t crit*	Result	Interpret		
Test 1 and 2	One tailed T-test	1st ≥ 2nd mean	-13.025	1.5E-27	1.654	Reject null	1	<	2
Test 2 and 3	One tailed T-test	1st ≥ 2nd mean	-0.394	3.5E-01	1.655	Accept null	2	=	3
Test 3 and 4	One tailed T-test	1st ≥ 2nd mean	4.107	3.0E-05	1.653	Reject null	3	>	4
Test 4 and 5	One tailed T-test	1st ≥ 2nd mean	14.177	3.2E-27	1.658	Reject null	4	>	5
Test 5 and 6	One tailed T-test	1st ≥ 2nd mean	6.111	2.6E-09	1.653	Reject null	5	>	6
Test 7 and 8	One tailed T-test	1st ≥ 2nd mean	-42.858	1.5E-89	1.654	Reject null	7	<	8

Test 8 and 9	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**75.262**	**5.7E-100**	**1.658**	**Reject null**	**8**	**>**	**9**
Test 10 and 11	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**40.955**	**3.5E-81**	**1.656**	**Reject null**	**10**	**>**	**11**
Test 12 and 13	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-4.255**	**1.7E-05**	**1.654**	**Reject null**	**12**	**<**	**13**
Test 13 and 14	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-4.083**	**3.4E-05**	**1.654**	**Reject null**	**13**	**<**	**14**
Test 18 and 19	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-9.213**	**2.8E-17**	**1.653**	**Reject null**	**18**	**<**	**19**
Test 19 and 20	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-5.527**	**6.6E-08**	**1.655**	**Reject null**	**19**	**<**	**20**
Test 20 and 21	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-3.237**	**7.2E-04**	**1.654**	**Reject null**	**20**	**<**	**21**
Test 21 and 22	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**8.068**	**1.6E-13**	**1.656**	**Reject null**	**21**	**>**	**22**
Test 22 and 23	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**9.175**	**1.1E-16**	**1.654**	**Reject null**	**22**	**>**	**23**
Test 23 and 24	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**4.274**	**1.5E-05**	**1.653**	**Reject null**	**23**	**>**	**24**
Test 25 and 26	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-13.706**	**6.5E-30**	**1.654**	**Reject null**	**25**	**<**	**26**
Test 26 and 27	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**34.702**	**1.2E-59**	**1.659**	**Reject null**	**26**	**>**	**27**
Test 28 and 29	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**24.027**	**9.8E-47**	**1.658**	**Reject null**	**28**	**>**	**29**
Test 30 and 31	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-0.092**	**4.6E-01**	**1.653**	**Accept null**	**30**	**=**	**31**
Test 31 and 32	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-2.290**	**1.2E-02**	**1.653**	**Reject null**	**31**	**<**	**32**
Test 33 and 34	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-0.930**	**1.8E-01**	**1.658**	**Accept null**	**33**	**=**	**34**
Test 34 and 35	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-1.432**	**7.7E-02**	**1.653**	**Accept null**	**34**	**=**	**35**
Test 1 and 19	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-6.144**	**4.3E-09**	**1.656**	**Reject null**	**1**	**<**	**19**
Test 2 and 20	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-3.986**	**5.6E-05**	**1.657**	**Reject null**	**2**	**<**	**20**
Test 3 and 21	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-5.763**	**2.3E-08**	**1.655**	**Reject null**	**3**	**<**	**21**
Test 4 and 22	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-0.405**	**3.4E-01**	**1.653**	**Accept null**	**4**	**=**	**22**
Test 5 and 23	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-3.148**	**1.0E-03**	**1.657**	**Reject null**	**5**	**<**	**23**
Test 6 and 24	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-1.273**	**1.0E-01**	**1.656**	**Accept null**	**6**	**=**	**24**
Test 7 and 25	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-3.151**	**9.9E-04**	**1.656**	**Reject null**	**7**	**<**	**25**
Test 8 and 26	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**7.596**	**1.3E-12**	**1.655**	**Reject null**	**8**	**>**	**26**
Test 9 and 27	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**0.060**	**4.8E-01**	**1.653**	**Accept null**	**9**	**=**	**27**
Test 10 and 28	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-4.051**	**4.2E-05**	**1.656**	**Reject null**	**10**	**<**	**28**
Test 11 and 29	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-0.580**	**2.8E-01**	**1.653**	**Accept null**	**11**	**=**	**29**
Test 12 and 30	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-5.578**	**8.2E-08**	**1.658**	**Reject null**	**12**	**<**	**30**
Test 13 and 31	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-3.286**	**6.6E-04**	**1.657**	**Reject null**	**13**	**<**	**31**
Test 14 and 32	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-3.013**	**1.6E-03**	**1.656**	**Reject null**	**14**	**<**	**32**
Test 15 and 33	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**0.121**	**4.5E-01**	**1.660**	**Accept null**	**15**	**=**	**33**
Test 16 and 34	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**-6.998**	**1.5E-10**	**1.660**	**Reject null**	**16**	**<**	**34**
Test 17 and 35	**One tailed T-test**	**1st ≥ 2nd mean**	**1.155**	**1.3E-01**	**1.660**	**Accept null**	**17**	**=**	**35**

สำหรับผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 12 ถึง 14 ได้ทำการจับคู่กันคราวละ 2 ชุดเพื่อทำการเปรียบเทียบกันเป็นคู่ ๆ (pairwise comparisons) รวมทั้งหมด 2 คู่ดังนี้คือ ผลของชุดการทดสอบที่ 12 กับ 13 และ 13 กับ 14 ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดการทดสอบเหล่านี้มีค่าไม่เท่ากัน แต่มีค่าเรียงจากน้อยไปมากได้ตามลำดับดังนี้คือ ค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 12 < 13 < 14 โดยที่ค่า *t Stat* และ *t Crit* ที่ได้จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบรายคู่เหล่านี้แสดงในตารางข้างบน

และได้ทำการจับคู่เปรียบเทียบกันคราวละ 2 ชุดอีกสำหรับผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 15 ถึง 17 รวมทั้งหมด 2 คู่ดังนี้คือ ผลของชุดการทดสอบที่ 15 กับ 16 และ 16 กับ 17 ทั้งนี้เนื่องจากชุด

ทดสอบที่ 15 ถึง 17 นี้ไม่มีความแตกต่างของโจทย์ในการทดสอบซ้ำแต่ละครั้งทั้ง 100 ครั้งเหล่านั้น จึงทำให้ได้ผลคำตอบซ้ำเดิมเท่ากันทุกครั้ง และได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของร้อยละของเศษการตัดรวม (Standard Deviation of *%waste*) เท่ากับศูนย์ทั้ง 3 ชุดทดสอบ การวิเคราะห์จึงนำค่าเฉลี่ยมาเปรียบเทียบกันเลยโดยไม่ได้ใช้การทดสอบสมมติฐาน One tailed T-test ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดการทดสอบเหล่านี้มีค่าเรียงจากน้อยไปมากได้ตามลำดับคือ ค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 16 < 15 < 17

สำหรับผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 18 ถึง 24 ได้ทำการจับคู่แล้ววิเคราะห์เปรียบเทียบกันเป็นรายคู่เช่นเดียวกับที่ผ่านมา ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบเหล่านี้มีค่าไม่เท่ากัน แต่มีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับดังนี้คือ ค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 24 < 23 < 18 < 19 = 22 < 20 < 21

สำหรับผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 25 ถึง 27 ผลจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบเป็นรายคู่เช่นกัน ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบเหล่านี้มีค่าไม่เท่ากัน แต่มีค่าเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับดังนี้คือ ค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 27 < 25 < 26 และการวิเคราะห์แบบ pairwise comparisons ของผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 28 และ 29 แปลความหมายได้ว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดการทดสอบทั้ง 2 นี้มีค่าไม่เท่ากัน โดยมีค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 29 < 28

สำหรับผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 30 ถึง 32 ได้ทำการจับคู่กันคราวละ 2 ชุดเพื่อทำการเปรียบเทียบกันเป็นคู่ ๆ (pairwise comparisons) รวมทั้งหมด 2 คู่ดังนี้คือ ผลของชุดการทดสอบที่ 30 กับ 31 และ 31 กับ 32 ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดการทดสอบเหล่านี้มีค่าเรียงจากน้อยไปมากได้ตามลำดับดังนี้คือ ค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 30 = 31 < 32

และได้ทำการจับคู่เปรียบเทียบกันคราวละ 2 ชุดอีกสำหรับผลคำตอบของชุดการทดสอบที่ 33 ถึง 35 รวมทั้งหมด 2 คู่ ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดการทดสอบเหล่านี้มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญคือ ค่าเฉลี่ยของชุดการทดสอบที่ 33 = 34 = 35

นอกจากนี้ยังมีการจับคู่เพื่อการวิเคราะห์เปรียบเทียบ (pairwise comparisons) แบบข้ามกลุ่มเพื่อหาความต่างที่เป็นผลมาจากปัจจัยการเปลี่ยนแปลงค่า L_i แบบสุ่ม โดยได้ทำการจับคู่ข้ามกลุ่มเปรียบเทียบกันรวม 17 คู่ดังนี้ ผลของชุดการทดสอบที่ 1 กับ 19, 2 กับ 20, ..., 14 กับ 32, 15 กับ 33, 16 กับ 34, และ 17 กับ 35 (หมายเหตุ ชุดทดสอบที่ 15 ถึง 17 ให้ค่าผลคำตอบที่เท่ากันทุกครั้ง หรือมีค่า S.D. = 0) ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบที่มาจากกลุ่มที่ค่า L_i คงที่ (เท่ากับโจทย์ปัญหาฐาน) มักจะน้อยกว่าที่มาจากกลุ่มที่ค่า L_i เปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม (สุ่มค่าใหม่ทุกครั้งภายในขอบเขตของกลุ่มช่วงความยาว) ได้แก่ 1<19, 2<20, 3<21, 5<23, 7<25, 10<28, 12<30, 13<31, 14<32, และ 16<34 แต่ในบางคู่ค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบที่มาจากกลุ่มที่ค่า L_i คงที่ กลับเท่ากับ ที่มาจากกลุ่มที่ค่า L_i เปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม ได้แก่ 4=22, 6=24, 9=27, 11=29, 15=33, 17=35 และมีเพียงหนึ่งคู่ที่ค่าเฉลี่ย

จากชุดทดสอบที่มาจากกลุ่มที่ค่า L_i คงที่ มากกว่า ที่มาจากกลุ่มที่ค่า L_i เปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม ได้แก่ 8>26 ซึ่งค่าทางสถิติที่ได้จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบรายคู่เหล่านี้แสดงไว้ในตารางข้างบนนี้

ข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวสำหรับค่าตัวแปรจำนวนขนาดท่อนความยาวที่ต่างกัน (m) และที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรขนาดความยาวของท่อนความต้องการ (L_i) มีดังต่อไปนี้

การหายไปของขนาดความยาวกลุ่มช่วง Very long และ Long ส่งผลให้ *%waste* ลดลงได้และลดลงน้อยกว่าของโจทย์ฐานที่ขนาดความยาวครบทุกกลุ่มช่วง และการหายไปของขนาดความยาวกลุ่มช่วง Tiny และ Intermediate จะส่งผลให้ *%waste* เพิ่มมากขึ้นได้และมากขึ้นกว่าของโจทย์ฐาน ส่วนการหายไปของขนาดความยาว Short และ Very short ก็ยิ่งส่งผลทำให้ *%waste* ยิ่งเพิ่มมากขึ้นอีก และการทดสอบแบบขยายวงกว้างก็ให้ผลที่สอดคล้องกันว่า การหายไปของขนาดความยาวกลุ่มช่วง Very long และ Long ทำให้ *%waste* ลดน้อยลง แต่ในทางตรงข้าม การหายไปของขนาดความยาวกลุ่มช่วง Tiny และ Very short ทำให้ *%waste* เพิ่มมากขึ้น และยิ่งเพิ่มมากขึ้นสำหรับการหายไปของขนาดความยาวกลุ่มช่วง Short และ Intermediate ซึ่งให้ปริมาณ *%waste* ที่สูงมากในการทดสอบนี้

ยิ่งไปกว่านั้นถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดความยาว L_i แบบสุ่มร่วมด้วย (กำหนดภายในขอบเขตความยาวของกลุ่มช่วง) ก็ยังคงให้ผลไปในทางเดิม โดยหากเปรียบเทียบกันแล้วจะสรุปได้ว่า หากมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดความยาว L_i แบบสุ่มร่วมด้วยจะส่งผลทำให้มี *%waste* เพิ่มขึ้นกว่าที่มีค่า L_i คงที่ได้

และที่ขนาดค่าตัวแปร m ที่เท่ากัน การหายไปของขนาดความยาวทั้งกลุ่มช่วงจะส่งผลให้เกิด *%waste* เพิ่มขึ้น (สำหรับกลุ่มช่วง Tiny, Very short, Short, และ Intermediate) หรือลดลง (สำหรับกลุ่มช่วง Long, และ Very long) มากกว่าการหายไปของขนาดความยาวแบบกระจายไปทุกกลุ่มช่วง

4.14 แบบจำลองปัญหา Contiguity ของการตัด

ส่วนประกอบหลักของแบบจำลอง (Optimization problem models) สำหรับปัญหา Contiguity ของการตัด แบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variables) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraint functions) ซึ่งรายละเอียดของส่วนประกอบหลักของแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีดังนี้

ตัวแปรตัดสินใจของแบบจำลองปัญหานี้คือ ลำดับการตัดตามรูปแบบการตัดที่ใช้ (ordering permutations of P_j) ของแผนการตัดที่ดีที่สุด

ตัวแปรตัดสินใจ: permutations of P_j

ยกตัวอย่างเช่น แผนการตัดที่ดีที่สุด (optimal cutting plan) (เป็นคำตอบที่ได้จากแบบจำลองปัญหา 1D-CSP ในหัวข้อ 4.2) อันหนึ่งมีการใช้รูปแบบการตัด (ที่แตกต่างกัน) เป็นจำนวน *n* = 5 รูปแบบ (หรือ ตัวแปร *nDiffPat*) Permutation ของลำดับการตัดนี้เป็น P_4-P_1-P_5-P_3-P_2

Cutting order	1	2	3	4	5
P_j	P_4	P_1	P_5	P_3	P_2

หากพิจารณาแผนการตัดที่ดีที่สุดอันหนึ่ง จะสามารถนำรูปแบบการตัดต่าง ๆ มาเรียงลำดับการตัดได้หลากหลายรูปแบบ

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแบบจำลองได้ใช้ค่าผลรวมจำนวนขนาดความยาวที่ต้องการที่ยังตัดไม่เสร็จ (ω) หรือผลรวมของ open orders ของลำดับการตัดของแผนการตัดนั้น โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ได้ค่าที่น้อยที่สุด

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์: $$\text{Minimize } \omega = \sum_{j=1}^{n}\left(\sum_{i=1}^{m} O_{ij}\right) \tag{10}$$

โดยที่ $$O_{ij} = \begin{cases} 0; if\ \sum_{j=1}^{J}\left(a_{ij}\cdot X_j\right) = 0 \text{ , or } \sum_{j=1}^{J}\left(a_{ij}\cdot X_j\right) = D_i \\ 1; otherwise \end{cases} \tag{11}$$

$\sum_i\left(O_{ij}\right)$ คือ จำนวนขนาดที่แตกต่างกันของท่อนความยาวที่ยังตัดได้ไม่ครบจำนวน ที่ขณะหลังจากทำการตัดตามรูปแบบการตัดที่ *J* ไปแล้ว และจะตัดรูปแบบที่ *J* +1 ต่อไป

O_{ij} คือ สถานะแสดงการอยู่ในระหว่างตัดหรือไม่ (open status) ของขนาดท่อนความยาวขนาดหนึ่ง (L_i) ถ้าหากว่า L_i หนึ่งยังไม่ได้เริ่มถูกตัดจะมีสถานะเป็นปิดหรือมีค่าเท่ากับ 0 หากกำลังอยู่ในระหว่างการตัดแต่ยังไม่ครบจำนวนจะมีสถานะเป็นเปิดหรือมีค่าเท่ากับ 1 แล้วขณะที่ทำการตัดตามรูปแบบการตัด (cutting patterns) ต่าง ๆ มาจนถึงรูปแบบที่ *J* หากรวมจำนวนท่อนที่ได้ตัดออกมาแล้วได้ครบจำนวนความต้องการทั้งหมดแล้ว (D_i) ก็จะมีสถานะเป็นปิดหรือมีค่าเท่ากับ 0

ฟังก์ชันข้อจำกัด ของแบบจำลองปัญหานี้มีเพียงเงื่อนไขการสร้างลำดับการตัดตามรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้ ซึ่งก็คือลำดับการตัดนั้นต้องไม่ซ้ำกันและต้องไม่ข้ามลำดับ และเลขที่แสดงลำดับต้องเป็นเลขจำนวนเต็มบวกเท่านั้น ดังนี้

Permutations of P_j = all different positive integers which is smaller than and equal to *n*

วิธีการแก้ปัญหา Contiguity เมื่อได้แบบจำลองของปัญหาแล้ว จึงนำไปทำการหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยเลือกใช้ optimization method เป็น Genetic Algorithm ทั้งนี้เนื่องจากเป็นวิธีการที่ยอมรับและใช้กันแพร่หลายถึงประสิทธิภาพ และปัญหานี้ยังมีลักษณะเป็น non-linear problem ซึ่งจะสามารถหาคำตอบได้ด้วย Genetic Algorithm

การโปรแกรมแบบจำลองปัญหา Contiguity ด้วยโปรแกรมกระดานคำนวณ (Spreadsheet) Microsoft Excel^{TM} 2013 โดยตัวแบบจำลองปัญหานี้จะอยู่รวมกับแบบจำลองปัญหา 1D-CSP ในไฟล์เดียวกัน เพื่อความสะดวกในการทำงาน เนื่องจากปัญหาทั้งสองปัญหานี้มีความเกี่ยวข้องคือค่าคำตอบแผนการตัดที่ดีที่สุดที่ได้จากแบบจำลองปัญหา 1D-CSP จะกลายเป็นตัวโจทย์ (ข้อมูลนำเข้า (input)) ของแบบจำลองปัญหา Contiguity และจะต้องหาคำตอบที่ดีที่สุดต่อกันไป รวมทั้งมีการแสดงข้อมูลผลลัพธ์ (output) ที่ได้นั้น นอกจากนี้ยังมีการเรียกใช้งานโปรแกรมส่วนเพิ่ม (add-ins program) เพื่อช่วยในการคำนวณและหาคำตอบ และการเขียนชุดคำสั่ง (macros) ด้วยภาษา VBA เพื่อให้โปรแกรมเกิดการทำงานโดยอัตโนมัติ ส่วนประกอบของแบบจำลองบน Excel แบ่งพื้นที่ของแบบจำลองออกเป็น 3 ส่วนคือ ข้อมูลโจทย์ปัญหา เซตของลำดับที่ดีที่สุดของการตัดตามรูปแบบการตัด การคำนวณค่าผลรวมจำนวนขนาดความยาวที่ต้องการที่ยังตัดไม่เสร็จ (ω) ดังแสดงในรูปต่าง ๆ และรายละเอียดประกอบข้างล่างนี้

ข้อมูลโจทย์ปัญหา คือพื้นที่ที่เชื่อมโยงกับค่าแผนการตัดคำตอบที่ดีที่สุดของแบบจำลองปัญหา 1D-CSP โดยไม่จำเป็นต้องป้อนข้อมูลนำเข้านี้จากผู้ใช้งาน แสดงตัวแผนการตัดที่ดีที่สุดซึ่งประกอบด้วยรูปแบบการตัดที่นำมาใช้ (P_j) และจำนวนครั้งของการตัดซ้ำ (X_j) และจะเป็นตัวโจทย์ปัญหา Contiguity ที่ใช้ในขั้นตอนการหาคำตอบต่อไป

		j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
		Xj	3	1	8	13	15	2	10	5	4	7	1	1	8	1	1	7	9	1	2	6	3
i	**Li**	**Pj**	**P1**	**P2**	**P3**	**P4**	**P5**	**P6**	**P7**	**P8**	**P9**	**P10**	**P11**	**P12**	**P13**	**P14**	**P15**	**P16**	**P17**	**P18**	**P19**	**P20**	**P21**
1	0.24	**Aij**	2			1	2		1		1		2	1			1		1				
2	0.69							2		2										1			
3	0.86																			1	4	1	
4	1.13				1												4						1
5	1.15											1		1		1						1	
6	1.89																		1				2
7	2.37			1														2					
8	2.82														2								
9	3.23			1		1														1			
10	4.25		1					2		1			1	1		1							
11	4.31			1						1				1	1								
12	4.53								1		1					1							
13	5.08								1				1							1			1
14	5.16		1								1						1	1					
15	6.42					1															1		
16	7.85																		1			1	
17	8.77				1							1											
18	9.42						1																

รูปที่ 4.12 ตัวอย่างข้อมูลโจทย์ปัญหา Contiguity บนไฟล์ Spreadsheet

เซตของลำดับที่ดีที่สุดของการตัดตามรูปแบบการตัด พื้นที่ส่วนถัดไปจะเป็นการนำแผนการตัดที่เป็นโจทย์มาทำการสลับลำดับการตัด (cutting order) ที่มีทั้งหมด n ไปเรื่อย ๆ ในระหว่างการหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยมีลำดับการตัดที่เป็นไปได้อยู่จำนวนมากถึง $n!$ ลำดับ เมื่อสร้างลำดับการตัดอันใหม่ขึ้นมาพิจารณาหนึ่งอัน กระดานคำนวณก็จะเรียกค่า X_j และ A_{ij} ที่สัมพันธ์กับ P_j นั้น ๆ ออกมา ดังแสดงตัวอย่างในรูปข้างล่างนี้

Cutting Order	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Pj	5	13	2	4	19	18	6	8	16	11	12	14	9	7	1	20	10	15	3	21	17
Xj	15	8	1	13	2	1	2	5	7	1	1	1	4	10	3	6	7	1	8	3	9
Aij	2	0	0	1	0	0	0	0	0	2	1	0	1	1	2	0	0	1	0	0	1
	0	0	0	0	0	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1	1	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1
	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	2	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0
	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

รูปที่ 4.13 เซตของลำดับที่ดีที่สุดของการตัดตามรูปแบบการตัด

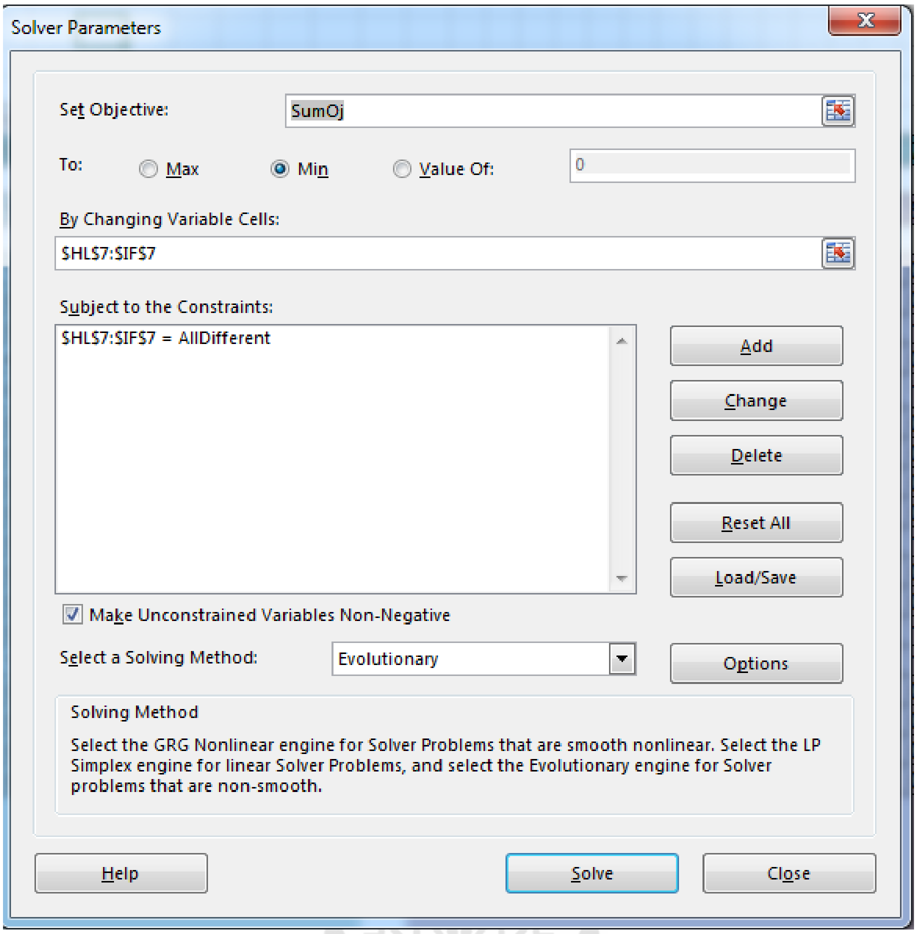
การคำนวณค่าผลรวมจำนวนขนาดความยาวที่ต้องการที่ยังตัดไม่เสร็จ (ω) ลำดับการตัดที่สร้างขึ้นแต่ละอันจะถูกนำไปคำนวณค่า O_{ij}, และ ω ตามสมการที่ 10 และ 11 ซึ่งพื้นที่ทั้งสามส่วนเหล่านี้รวมกันทำให้เกิดเป็นแบบจำลองปัญหา Contiguity นั่นเอง

ω (initial)	164
ω (optimal)	81

i																						
	Pj	5	13	2	4	19	18	6	8	16	11	12	14	9	7	1	20	10	15	3	21	17
	Oj	0	1	3	4	4	5	6	5	5	5	5	6	6	5	4	4	4	4	3	2	0
1	***Oij***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2		0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3		0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
4		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
5		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
6		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
7		0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9		0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10		0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
11		0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
13		0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
14		0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
15		0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
17		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
18		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

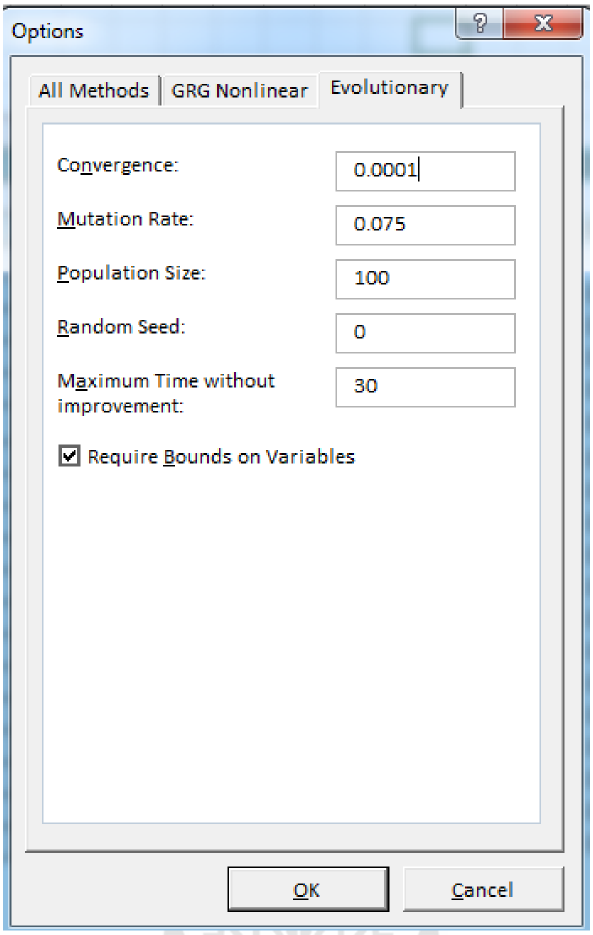
รูปที่ 4.14 การคำนวณค่าตัวแปรที่ใช้ตรวจวัดความไม่ต่อเนื่องของการตัด

เครื่องมือช่วยหาคำตอบด้วย Genetic Algorithm แบบจำลองปัญหาที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม Microsoft Excel 2013 นี้ได้เลือกใช้วิธีการหาคำตอบด้วยวิธี Genetic Algorithm หรือที่เรียกว่า Evolutionary Solving Method ของโปรแกรมสำเร็จรูป Solver™ ของบริษัท Frontline Systems, Inc. ซึ่งเป็นโปรแกรม Add-in ที่มีอยู่แล้วใน Excel สามารถเรียกใช้ได้ด้วยผู้ใช้งานเองหรือด้วยชุดคำสั่งอัตโนมัติในภาษา VBA หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลนำเข้าลงในโปรแกรม Solver แสดงไว้ในรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 4.15 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลของแบบจำลองลงในโปรแกรม Solver

นอกจากนี้ยังมีการป้อนค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ใน Genetic Algorithm ด้วย ได้แก่ ค่าระดับความละเอียดในการคำนวณ (Convergence), อัตราการกลายพันธุ์ (Mutation Rate), ขนาดจำนวนประชากร (Population Size), ค่าเริ่มต้นการสุ่ม (Random Seed), เวลาสูงที่สุดเมื่อไม่มีความก้าวหน้า (Maximum Time without Improvement) ซึ่งเป็นตัวเงื่อนไขการจบสิ้นของกระบวนการหาคำตอบด้วย Genetic Algorithm โดยในการทดสอบได้กำหนดใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้ตามที่แสดงในรูปข้างล่างนี้ คือ Convergence = 0.0001, Mutation Rate = 0.075, Population Size = 100, Random Seed = 0, Maximum Time without Improvement = 30 seconds



รูปที่ 4.16 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลค่าพารามิเตอร์ของ Evolutionary Solving Method

เครื่องมือช่วยสร้างชุดคำสั่งอัตโนมัติ นอกจากโปรแกรม Excel จะมีเครื่องมือช่วยมากมายในการสร้างแบบจำลองของปัญหาและหาคำตอบที่ดีที่สุดแล้ว ยังมีเครื่องมือช่วยสร้างชุดคำสั่งอัตโนมัติ (Macros) ที่ใช้ภาษา VBA ในการพัฒนา ซึ่งในการวิจัยนี้จำเป็นต้องพัฒนาโปรแกรมเพิ่มเหล่านี้ขึ้นเองเพื่อเรียกใช้งาน โปรแกรม Solver ให้ทำงานหาคำตอบของแบบจำลองปัญหา Contiguity ต่อเนื่องทันทีหลังจากที่ได้คำตอบแผนการตัดที่ดีที่สุดจากการแก้ปัญหา 1D-CSP แล้วทุกครั้ง ซึ่งเครื่องมือ VBA Editor นี้มีความสำคัญที่ทำให้การหาคำตอบเป็นไปอย่างต่อเนื่องอัตโนมัติและราบรื่น นอกจากนี้ยังช่วยควบคุมการทดสอบโจทย์ปัญหาตัวอย่างที่ทำการทดสอบจำนวนมากและแบ่งเป็นหลากหลายกรณี ให้เกิดขึ้นอย่างเป็นลำดับอย่างต่อเนื่องและอัตโนมัติ พร้อมทั้งยังสั่งให้บันทึกผลคำตอบที่ได้ในแต่ละครั้งเพื่อจัดเก็บไว้อย่างเป็นระเบียบได้อีกด้วย

4.15 แบบแผนการทดสอบชุดที่ 4

แบบแผนการทดสอบชุดที่ 4 สร้างขึ้นเพื่อเป็นการทดสอบหาคำตอบของประเด็นปัญหาความต่อเนื่อง (contiguity) ของงานการตัด โดยที่ใช้ตัวแปรสำหรับตรวจวัดค่าความไม่ต่อเนื่องเป็น ผลรวมจำนวนขนาดความยาวที่ต้องการที่ยังตัดไม่เสร็จ (ω) ของลำดับการตัดของแผนการตัด (cutting plan) ที่ดีที่สุด ซึ่งแผนการตัดที่ดีที่สุดที่นำมาใช้ได้มาจากการแก้ปัญหาการตัด 1D-CSP ที่ทำในขั้นตอนก่อนหน้านั่นเอง เนื่องจากมีแบบแผนการทดสอบถึง 3 แบบแผนสำหรับทดสอบแบบจำลองปัญหาการตัด 1D-CSP หรือรวมกันทั้งสิ้น 37 + 54 + 35 = 126 ชุดทดสอบ (Tests) และแต่ละชุดทดสอบจะทำถูกทดสอบซ้ำเป็นจำนวน 100 ครั้ง แต่ละครั้งที่ทดสอบอาจสุ่มได้ค่าโจทย์ต่าง ๆ กันออกไป รวมถึงทำให้ได้คำตอบแผนการตัดที่ดีที่สุดแตกต่างกันออกไปด้วย นอกจากนี้คำตอบแผนการตัดที่อาจได้ปริมาณเศษการตัด (%waste) เท่ากัน อาจประกอบด้วยรูปแบบการตัดและจำนวนครั้งการตัดที่แตกต่างกันได้ ซึ่งจะทำให้กลายเป็นโจทย์ปัญหาต่อเนื่อง (contiguity) ที่ต่างกันได้

ดังนั้นจึงทำการเลือกชุดทดสอบที่เป็นพื้นฐาน และชุดทดสอบที่ได้ผลดีที่สุดและแย่ที่สุด (ใช้ค่า Average %waste เป็นเกณฑ์) จากแบบแผนการทดสอบทั้งสามที่ผ่านมา ได้ว่าแบบแผนการทดสอบนี้จะมีชุดทดสอบทั้งหมด 6 ชุด รวมชุดทดสอบพื้นฐานด้วย แต่ละชุดจะถูกทดสอบซ้ำ ๆ เป็นจำนวน 100 ครั้ง เพื่อให้มีข้อมูลผลการทดสอบจำนวนมากเพียงพอต่อการวิเคราะห์ทางสถิติและสร้างบทสรุปทั่วไปได้ รายละเอียดของชุดการทดสอบทั้งหมด พร้อมทั้งค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 4.9 ข้อมูลการปรับเปลี่ยนค่า L_i และ D_i (ซึ่งส่งผลต่อค่า m) ของโจทย์ปัญหาและค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบทั้ง 6 ชุด

Test no.	Treatments: Variations of *Li* and *Di*				Number of active m	Total of Di of Group# 1	2	3	4	5	6	Results: Average Sum*Xj*	Average *%waste*	S.D. of *%waste*	
base	Fix Li	All G	Fix Di	All G	18	45	45	45	45	45	45	108	2.61	n.a.	
1	Fix Li	All G	Vary Di	All G	18	45	45	45	45	45	45	109.2	2.95	0.46	AKA 1#12
2	Fix Li	All G	Vary Di	All G	18	24	24	24	24	150	24	174.0	37.45	3.87	AKA 1#30
3	Fix Li	All G	Vary Di	All G	18	18	18	18	18	180	18	198.0	48.98	4.59	AKA 1#36
4	Vary Li	All G	Vary Di	All G	18	150	24	24	24	24	24	66.3	1.38	0.63	AKA 2#25
5	Vary Li	All G	Vary Di	All G	18	160	40	40	40	40	40	103.4	1.31	0.59	AKA 2#31

สำหรับชุดทดสอบ base เป็นโจทย์ปัญหาฐาน ที่ให้ค่า %waste เท่ากันเสมอ (แม้ว่าอาจเป็นแผนการตัดที่มีรูปแบบการตัดต่างกัน) ชุดทดสอบที่ 1 เป็นโจทย์ที่มีการปรับเปลี่ยนสุ่มค่า D_i ของกลุ่ม

ช่วงต่าง ๆ ทั้ง 6 ช่วง ให้มีผลรวมเท่ากันเท่ากับ 45 ท่อน ซึ่งเป็นการปรับแต่งแบบชุดทดสอบที่ 12 ของแบบแผนการทดสอบชุดที่ 1

ชุดทดสอบที่ 2 และ 3 เป็นโจทย์ที่มีการปรับเปลี่ยนสุ่มเฉพาะค่าผลรวม D_i ของกลุ่มช่วงต่าง ๆ ทั้ง 6 ช่วง ให้มีผลรวมในสัดส่วนเป็น 24:24:24:24:150:24 และ 18:18:18:18:180:18 ตามลำดับและกำหนดให้ค่า L_i คงที่เท่ากับโจทย์ปัญหาฐาน ซึ่งเป็นการปรับแต่งแบบชุดทดสอบที่ 30 และ 36 ของแบบแผนการทดสอบชุดที่ 1 ซึ่งเป็นชุดทดสอบที่ให้คำตอบที่แย่ที่สุด 2 อันดับแรกที่ผ่านมา

ชุดทดสอบที่ 4 และ 5 เป็นโจทย์ที่มีการปรับเปลี่ยนสุ่มค่าผลรวม D_i ของกลุ่มช่วงต่าง ๆ ทั้ง 6 ช่วง ให้มีผลรวมในสัดส่วนเป็น 150:24:24:24:24:24 และ 160:40:40:40:40:40 ตามลำดับและกำหนดให้มีการปรับเปลี่ยนสุ่มค่า L_i ทุกครั้งตามค่าขอบเขตของแต่ละกลุ่มช่วง ซึ่งเป็นการปรับแต่งแบบชุดทดสอบที่ 25 และ 31 ของแบบแผนการทดสอบชุดที่ 2 ซึ่งเป็นชุดทดสอบที่ให้คำตอบที่ดีที่สุด 2 อันดับแรกที่ผ่านมา

4.16 การวิเคราะห์ผลการทดสอบชุดที่ 4

ผลการทดสอบทั้งหมด 6 ชุดทดสอบ (รวมโจทย์ปัญหาฐาน) ได้แสดงไว้ในตารางข้างบนนี้ (พร้อมรายละเอียดการปรับแต่งของแต่ละชุดทดสอบ) ซึ่งมีผลของค่าต่าง ๆ ที่คัดเลือกมาแสดงไว้ 3 ค่า ได้แก่ ค่าเฉลี่ยของผลรวมจำนวนวัสดุคงคลังที่ใช้ (Average Sum(X_j)), ค่าเฉลี่ยของร้อยละของเศษการตัดรวม (Average *%waste*), และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของร้อยละของเศษการตัดรวม (Standard Deviation of *%waste*) ทั้งนี้ผลของค่าทั้ง 3 ค่านี้เป็นผลของส่วนการแก้ปัญหาการตัด 1D-CSP ซึ่งแสดงไว้เพื่อประกอบการพิจารณาในเบื้องต้น แต่ผลค่าที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหา Contiguity ได้แสดงไว้ในตารางข้างล่างนี้ ได้แก่ ผลของค่า Average และ Standard Deviation ของค่าผลรวมจำนวนขนาดความยาวที่ต้องการที่ยังตัดไม่เสร็จ ทั้งก่อน (ω Before) และหลัง (ω After) จากการหาคำตอบที่ดีที่สุด (optimization) และจำนวนรูปแบบการตัดที่ใช้ในแผนการตัด (*nDiffPat*) รวมทั้งสัดส่วนของค่าตัวแปรเหล่านี้ รวมจำนวน 10 ค่า

ทั้งนี้ค่าสัดส่วน (ω *After*/ ω *Before*) นำมาใช้สังเกตการปรับปรุงของความต่อเนื่องของการตัดของคำตอบจากการ optimization และค่าสัดส่วน (ω *After/nDiffPat*) เป็นการเทียบค่าความต่อเนื่องของการตัดของคำตอบที่ได้กับจำนวนรูปแบบการตัดที่ใช้ในแผน ซึ่งทั้งสองค่าสัดส่วนนี้จะเป็นค่าที่ใช้ในการประเมินข้อสมมติฐานในการทดสอบที่ว่า ความต่อเนื่องของการตัดที่ดีสามารถทำได้ด้วยการจัดเรียงลำดับการตัดตามรูปแบบการตัด (cutting patterns) ของแผนการตัด และการลดลงของค่า ω จากการทำ optimization มีความสัมพันธ์กับจำนวนรูปแบบการตัดที่ใช้และกับปริมาณเศษการตัดของแผนการตัดนั้น

ตารางที่ 4.10 ผลค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลคำตอบจากชุดการทดสอบทั้ง 6 ชุด ของโจทย์ปัญหา Contiguity

	Results:									
Test no.	Average of (ω Before)	S.D. of (ω Before)	Average of (ω After)	S.D. of (ω After)	Average of (nDiffPat)	S.D. of (nDiffPat)	Average of (ω After / ω Before)	S.D. of (ω After / ω Before)	Average of (ω After / nDiffPat)	S.D. of (ω After / nDiffPat)
base	**146.3**	**37.1**	**68.8**	**19.4**	**20.1**	**2.47**	**0.471**	**0.059**	**3.601**	**1.078**
1	**125.0**	**31.4**	**55.3**	**17.2**	**19.4**	**2.27**	**0.440**	**0.069**	**3.400**	**0.921**
2	**35.4**	**18.6**	**10.5**	**5.3**	**12.6**	**1.61**	**0.314**	**0.085**	**0.727**	**0.360**
3	**29.7**	**13.6**	**9.0**	**4.3**	**12.0**	**1.39**	**0.318**	**0.085**	**0.887**	**0.446**
4	**132.5**	**30.5**	**65.3**	**17.3**	**19.4**	**2.12**	**0.494**	**0.076**	**2.879**	**0.975**
5	**139.3**	**32.9**	**71.3**	**18.9**	**19.9**	**2.24**	**0.515**	**0.078**	**3.500**	**1.056**

ข้อมูลค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วน (ω *After/* ω *Before*) และค่าเฉลี่ยของสัดส่วน (ω *After/nDiffPat*) ถูกนำมาใช้เป็นหลักในการเปรียบเทียบและประเมินคำตอบที่ได้จากการทดสอบด้วยหลักการทางสถิติ คือการวิเคราะห์ one-tailed t-Test เพื่อหาความแตกต่างระหว่างกลุ่มข้อมูลผลการทดสอบจำนวน 2 กลุ่ม ซึ่งจะเป็นการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis test) ที่ว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลทั้งสองมากกว่าหรือเท่ากับกันหรือไม่ โดยจะใช้ค่าระดับนัยสำคัญหรือค่า alpha ที่เท่ากับ 0.05 ตลอดทุกการวิเคราะห์ การวิเคราะห์ one-tailed t-Test นี้จัดแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม สำหรับค่าสัดส่วนทั้งสอง และการวิเคราะห์ทั้งสองกลุ่มทำโดยจับคู่ผลคำตอบของชุดทดสอบทั้ง 6 คราวละ 2 ชุดเพื่อทำการเปรียบเทียบเป็นคู่ ๆ (pairwise comparisons) รวมทั้งหมด 5 คู่ดังนี้คือ ผลของชุดการทดสอบที่โจทย์ฐาน กับ 1, 1 กับ 2, 2 กับ 3, 3 กับ 4, และ 4 กับ 5

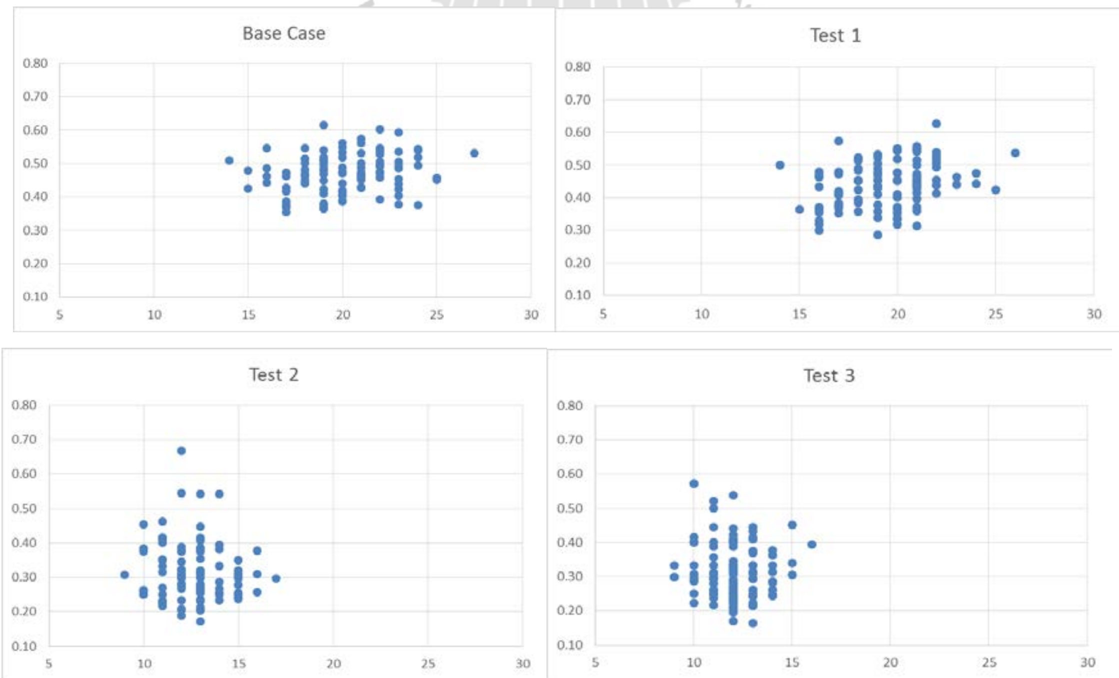
ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยจากชุดการทดสอบเหล่านี้ส่วนใหญ่มีค่าไม่เท่ากันอย่างมีนัยยะสำคัญ และพอสังเกตได้ว่า ค่าสัดส่วนทั้ง (ω *After/* ω *Before*) และ (ω *After/nDiffPat*) ของชุดทดสอบที่ 2 และ 3 (ให้ค่า %waste ที่แย่ที่สุดสองอันดับแรก) มีค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วน (ω *After/* ω *Before*) = 0.314 และ = 0.318 ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วน (ω *After/nDiffPat*) = 0.727 และ = 0.887 ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะมีค่าน้อยกว่า ค่าของชุดทดสอบที่เหลือ ส่วนค่าสัดส่วนทั้งสองของชุดทดสอบที่ โจทย์ฐาน, 1, 4, และ 5 แม้มีความแตกต่างกัน แต่ก็ใกล้เคียงกันและไม่มีทิศทางที่ชัดเจน โดยที่ผลค่า *t Stat* และ *t Crit* ที่ได้จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบรายคู่เหล่านี้มีรายละเอียดแสดงในตารางข้างล่าง

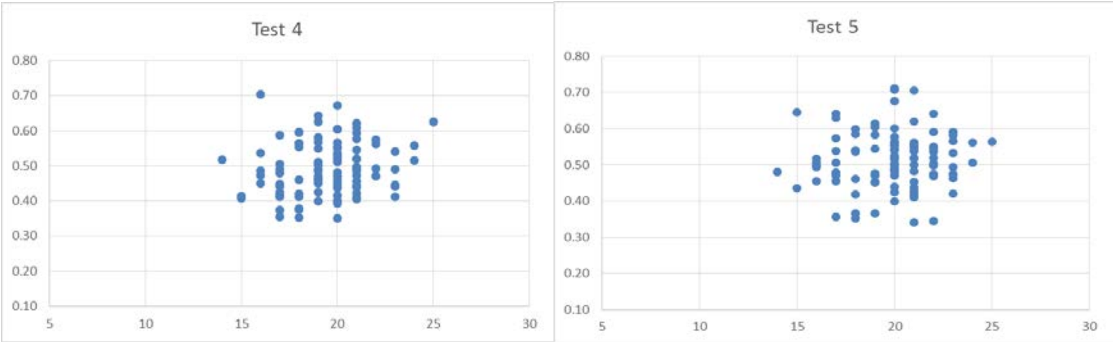
ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วน (ω *After/* ω *Before*) และสัดส่วน (ω *After/nDiffPat*) ของผลคำตอบจากชุดการทดสอบทั้ง 6 ชุด

%waste data from tests	Analysis method	Null hypothesis	*t Stat*	*p-value*	*t crit*	Result	Interpret
Hypothesis tests for the averages of (ω *After*/ ω *Before*)							
Test base and 1	One tailed T-test	1st ≥ 2nd mean	3.376	4.5E-04	1.653	Reject null	base > 1
Test 1 and 2	One tailed T-test	1st ≥ 2nd mean	11.558	4.5E-24	1.653	Reject null	1 > 2
Test 2 and 3	One tailed T-test	1st ≥ 2nd mean	-0.364	3.6E-01	1.653	Accept null	2 = 3
Test 3 and 4	One tailed T-test	1st ≥ 2nd mean	-15.455	5.3E-36	1.653	Reject null	3 < 4
Test 4 and 5	One tailed T-test	1st ≥ 2nd mean	-1.873	3.1E-02	1.653	Reject null	4 < 5
Hypothesis tests for the averages of (ω *After*/*nDiffPat*)							
Test base and 1	One tailed T-test	1st ≥ 2nd mean	1.416	7.9E-02	1.653	Accept null	base = 1
Test 1 and 2	One tailed T-test	1st ≥ 2nd mean	27.023	2.9E-55	1.657	Reject null	1 > 2
Test 2 and 3	One tailed T-test	1st ≥ 2nd mean	-2.792	2.9E-03	1.653	Reject null	2 < 3
Test 3 and 4	One tailed T-test	1st ≥ 2nd mean	-18.573	8.8E-40	1.656	Reject null	3 < 4
Test 4 and 5	One tailed T-test	1st ≥ 2nd mean	-4.322	1.2E-05	1.653	Reject null	4 < 5

เมื่อนำค่าสัดส่วน (ω *After*/ ω *Before*) ที่ได้จากการทดสอบซ้ำในแต่ละครั้งทั้ง 100 ครั้ง ของทุกชุดทดสอบมาเขียนจุดลงบนกราฟเทียบกับค่า *nDiffPat* และ *%waste* เพื่อสังเกตความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองคู่นี้ จะได้รูปกราฟต่าง ๆ ดังแสดงข้างล่างต่อไปนี้

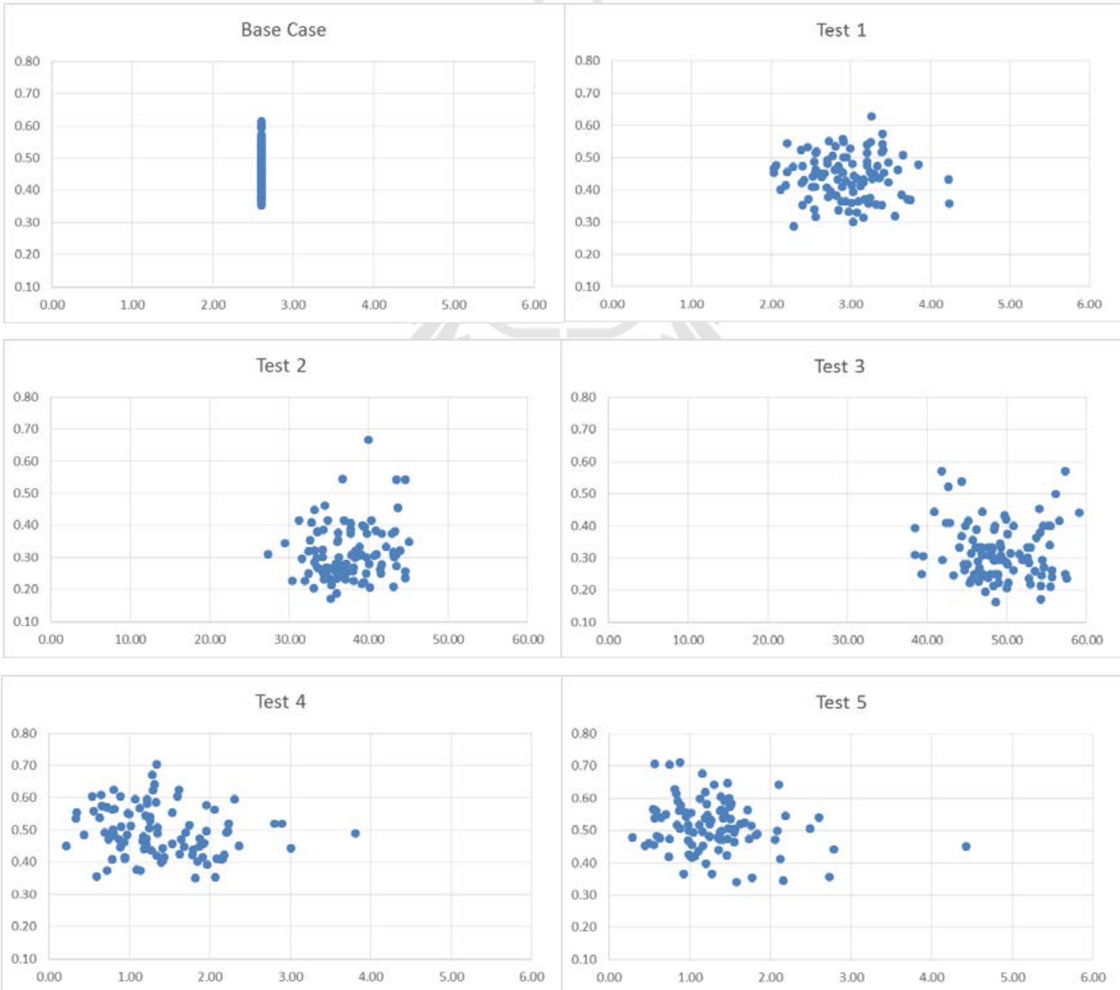
สำหรับจุดกราฟของค่าสัดส่วน (ω *After*/ ω *Before*) เทียบกับค่า *nDiffPat* พบว่าไม่มีความสัมพันธ์ที่ชัดเจน ผลที่ได้จากชุดทดสอบที่ โจทย์ฐาน, 1, 4, และ 5 มีกระจายของจุดกราฟที่บริเวณใกล้เคียงกันมาก แต่สำหรับชุดทดสอบที่ 2 และ 3 มีกระจายของจุดกราฟที่บริเวณค่าที่น้อยกว่าของกลุ่มแรก คือมีค่าสัดส่วน (ω *After*/ ω *Before*) และค่า *nDiffPat* ที่น้อยกว่า





รูปที่ 4.17 กราฟจุดของค่าสัดส่วน (ω *After*/ ω *Before*) เทียบกับค่า *nDiffPat*

สำหรับจุดกราฟของค่าสัดส่วน (ω *After*/ ω *Before*) เทียบกับค่า *%waste* พบว่าไม่มีความสัมพันธ์ที่ชัดเจน ผลที่ได้จากชุดทดสอบที่ โจทย์ฐาน, 1, 4, และ 5 มีค่าสัดส่วน (ω *After*/ ω *Before*) ที่ใกล้เคียงกันแม้จะมีค่า *%waste* ที่ค่อนข้างต่างกัน แต่สำหรับชุดทดสอบที่ 2 และ 3 มีค่าสัดส่วน (ω *After*/ ω *Before*) ที่น้อยกว่ากลุ่มที่แล้วและมีค่า *%waste* ที่มากกว่ามาก



รูปที่ 4.18 กราฟจุดของค่าสัดส่วน (ω *After*/ ω *Before*) เทียบกับค่า *%waste*

ข้อสรุปที่ได้จากการทดสอบและวิเคราะห์ประเด็นความต่อเนื่องของโจทย์ปัญหาการตัด พบว่า แผนการตัดที่ให้ค่า *%waste* สูงจะมีค่า *nDiffPat* ที่น้อยกว่า (รูปแบบการตัดไม่หลากหลาย) และสามารถปรับปรุงค่าความต่อเนื่องของการตัดจากคำตอบของแบบจำลองปัญหานี้ได้มากกว่า

แผนการตัดที่มีค่า *nDiffPat* ที่น้อยกว่า จะมีค่า ω *Before* น้อยกว่า (มีความต่อเนื่องของการตัดมากกว่า) และจะสามารถปรับปรุงให้ได้สัดส่วน (ω *After*/ ω *Before*) ที่น้อยกว่าได้

4.17 สรุปผลการพัฒนา

การสร้างแบบจำลองปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้น (1D-CSP) สำหรับงานก่อสร้าง ขึ้นมาในการวิจัยนี้ เพื่อให้ได้เครื่องมือใหม่ที่มีประสิทธิภาพดีสำหรับการวางแผนการตัดที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยเกิดเป็นปริมาณร้อยละของเศษการตัดจากงาน (*%waste*) น้อยที่สุด และได้นำแบบจำลองนี้ไปใช้ต่อในการทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาผลกระทบจากลักษณะคละของโจทย์ ที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรต่าง ๆ ที่กำหนดลักษณะคละของโจทย์ ได้แก่ จำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i) ความยาวของท่อน (L_i) และ จำนวนขนาดท่อนความยาวที่ต่างกัน (m) นอกจากนี้คำตอบแผนการตัดที่ดีที่สุดที่ได้จากแบบจำลองนี้ยังถูกนำไปใช้เป็นโจทย์นำเข้าของแบบจำลองปัญหาความต่อเนื่องของการตัด (contiguity) ที่ก็เป็นอีกแบบจำลองหนึ่งที่ถูกสร้างขึ้นในการวิจัยนี้เช่นกัน

ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทั้งสองนั้นได้ทำเป็นลำดับ โดยเริ่มจากการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองปัญหาสำหรับการหาคำตอบที่ดีที่สุด (optimization models) ของปัญหาการตัด (1D-CSP) ก่อน ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวแปรที่เป็นค่าคำตอบที่ต้องการหา (decision variables) คือแผนการตัด (รูปแบบการตัดที่ใช้ (P_j) และจำนวนครั้งการตัด (X_j) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ที่ใช้ประเมินหาคำตอบที่ดี ซึ่งก็คือ ร้อยละของปริมาณเศษการตัด (*%waste*) จากนั้นจึงสร้างวิธีการแก้ปัญหา ซึ่งปัญหา 1D-CSP ได้ใช้แนวทาง pattern-oriented approach ที่สร้างรูปแบบการตัดที่ประสิทธิภาพดีด้วย Intensive Search Algorithm และหาจำนวนครั้งการตัดด้วย Delayed Pattern Generation Technique ขั้นตอนถัดไปคือการสร้างของส่วนที่เป็นแบบจำลองปัญหาความต่อเนื่อง (contiguity) ซึ่งมี decision variables เป็น ลำดับของการตัดตามรูปแบบการตัดที่ใช้ (ordering permutations of P_j) และมี objective function เป็นค่าผลรวมจำนวนขนาดความยาวที่ต้องการที่ยังตัดไม่เสร็จ (ω) จากนั้นจึงสร้างวิธีการแก้ปัญหา contiguity ซึ่งได้เลือกใช้ Genetic Algorithm แบบจำลองทั้งสองดังกล่าวนี้ได้ถูกนำมาพัฒนาเป็นโปรแกรมในโปรแกรม Microsoft Excel 2013 ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่นำเข้าข้อมูลโจทย์ ส่วนการคิดคำนวณค่าต่าง ๆ ส่วนที่ควบคุมการทำงานของชุดคำสั่งอัตโนมัติ ส่วนที่ใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุด และส่วนที่แสดงผลคำตอบ ซึ่งทุกส่วนเหล่านี้บรรจุรวมกันอยู่ในไฟล์รูปแบบ .xlsx จำนวนหนึ่งไฟล์ ในการวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องมือสำเร็จรูป (Add-in)

คือ Solver™ ที่มีอยู่ใน Microsoft Excel 2013 เพื่อช่วยในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของแบบจำลองทั้งสอง

การทดสอบแบบจำลองการตัด (1D-CSP) ได้ถูกออกแบบให้แบ่งออกเป็น 3 แบบแผนการทดสอบเพื่อให้ครอบคลุมตัวแปรต่าง ๆ ที่กำหนดลักษณะคละของโจทย์ปัญหาการตัด และมีแบบแผนการทดสอบอีก 1 ชุดที่ใช้สำหรับการทดสอบแบบจำลองความต่อเนื่อง (contiguity) ทั้งนี้ในการทดสอบเหล่านี้จะมีการอ้างอิงเปรียบเทียบกับโจทย์ปัญหาฐานที่สร้างขึ้นเพื่อจำลองโจทย์ปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นสำหรับงานก่อสร้างทั่วไป ข้อสรุปของผลการทดสอบมีดังต่อไปนี้

แบบแผนการทดสอบชุดที่ 1 เป็นการวิเคราะห์ความอ่อนไหวสำหรับค่าตัวแปรจำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i) พบว่าการกระจายของจำนวนท่อนที่ต้องการอย่างสม่ำเสมอ (uniform distribution) ไปในขนาดความยาวที่ต้องการต่าง ๆ จะทำให้เกิดปริมาณเศษการตัดรวมจากแผนการตัดที่ดีที่สุดน้อยกว่าการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอ และสัดส่วน (proportion) การกระจายของจำนวนท่อนที่ต้องการที่มีผลต่อปริมาณเศษการตัดรวม ซึ่งหากจำนวนท่อนที่ต้องการของกลุ่มช่วงความยาวขนาดสั้น ๆ มีสัดส่วนที่มากกว่าจะช่วยให้ปริมาณเศษการตัดรวมลดลงได้ แต่ในทางกลับกัน หากจำนวนท่อนที่ต้องการของกลุ่มช่วงความยาวขนาดยาวมีสัดส่วนที่มากกว่าจะทำให้ปริมาณเศษการตัดรวมเพิ่มขึ้น

แบบแผนการทดสอบชุดที่ 2 มีข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวสำหรับค่าตัวแปรขนาดความยาวของท่อนความต้องการ (L_i) และจำนวนความต้องการของแต่ละขนาดความยาว (D_i) การเปลี่ยนแปลงของ L_i และ D_i แบบพร้อม ๆ กันทุกกลุ่มช่วง ส่งผลไปในทางที่ทำให้ *%waste* มากขึ้นกว่าการเปลี่ยนแปลงของ L_i แบบคราวละหนึ่งกลุ่มช่วง และมากขึ้นกว่าการไม่เปลี่ยนแปลงของ D_i และยังพบว่าหากจำนวนท่อนที่ต้องการของกลุ่มช่วงความยาวขนาดสั้น (กลุ่มช่วงขนาดที่ 1 และ 2) มีสัดส่วนที่มากกว่าจะช่วยให้ปริมาณเศษการตัดรวมลดลงได้ แต่ในทางกลับกัน หากจำนวนท่อนที่ต้องการของกลุ่มช่วงความยาวขนาดยาว (กลุ่มช่วงขนาดที่ 5 และ 6) มีสัดส่วนที่มากกว่าจะทำให้ปริมาณเศษการตัดรวมเพิ่มขึ้น

แบบแผนการทดสอบชุดที่ 3 มีข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวสำหรับค่าตัวแปรจำนวนขนาดท่อนความยาวที่ต่างกัน (*m*) การหายไปของขนาดความยาวกลุ่มช่วง Very long และ Long ทำให้ *%waste* ลดน้อยลง แต่ในทางตรงข้าม การหายไปของขนาดความยาวกลุ่มช่วง Tiny และ Very short ทำให้ *%waste* เพิ่มมากขึ้น และยิ่งเพิ่มมากขึ้นสำหรับการหายไปของขนาดความยาวกลุ่มช่วง Short และ Intermediate และที่ขนาดค่าตัวแปร *m* ที่เท่ากัน การหายไปของขนาดความยาวทั้งกลุ่มช่วงจะส่งผลให้เกิด *%waste* เพิ่มขึ้น (สำหรับกลุ่มช่วง Tiny, Very short, Short, และ Intermediate) หรือลดลง (สำหรับกลุ่มช่วง Long, และ Very long) มากกว่าการหายไปของขนาดความยาวแบบกระจายไปทุกกลุ่มช่วง

แบบแผนการทดสอบชุดที่ 4 มีข้อสรุปคือ แผนการตัดที่ให้ค่า *%waste* สูงจะมีค่า *nDiffPat* ที่น้อยกว่า (รูปแบบการตัดไม่หลากหลาย) และสามารถปรับปรุงค่าความต่อเนื่องของการตัดจากคำตอบของแบบจำลองปัญหาได้ในมากกว่า ส่วนแผนการตัดที่มีค่า *nDiffPat* ที่น้อยกว่า จะมีค่า ω *Before* น้อยกว่า (มีความต่อเนื่องของการตัดมากกว่า) และจะสามารถปรับปรุงให้ได้สัดส่วน (ω *After*/ ω *Before*) ที่น้อยกว่าได้

ผลการทดสอบจำนวนมากในบทนี้ชี้ให้เห็นว่าลักษณะคละของโจทย์ปัญหาการตัดส่งผลต่อปริมาณเศษการตัดที่จะเกิดขึ้นและยังส่งผลต่อความต่อเนื่องในงานการตัดด้วย ดังนั้นจากความเข้าใจอันนี้จะทำให้สามารถนำไปใช้จัดเซ็ตหรือล็อตของงานการตัดวัสดุคงคลังให้เกิดลักษณะคละของโจทย์ในแบบที่จะทำให้เกิดเศษการตัดน้อย ๆ ได้ ซึ่งจะเป็นการลดปริมาณเศษจากงานการตัดอีกแนวทางหนึ่งที่นอกเหนือจากการสร้างแผนการตัดที่ดีที่สุดจากการ optimization และเมื่อได้แผนการตัดที่ดีที่สุดแล้วก็ควรนำมาทำการจัดลำดับการตัดตามรูปแบบการตัดเพื่อให้เกิดความต่อเนื่องมากที่สุด ซึ่งจะช่วยประหยัดต้นทุนค่าแรงงาน และพื้นที่ในการทำงานได้อีกด้วย

บทที่ 5 บทสรุป

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ที่ต้องการสร้างแบบจำลองปัญหาการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้น (One dimensional cutting stock problem: 1D-CSP) และวิธีการหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งจะสามารถนำแบบจำลองที่ได้มาใช้ศึกษาผลกระทบของลักษณะคละของรายการความต้องการ (demand assortment) ที่มีต่อเศษการตัด และยังมีความประสงค์ในการสร้างแบบจำลองปัญหาการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นที่รวมประเด็นความต่อเนื่องของการตัด (contiguity) และวิธีการหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกันกับปัญหาแรกที่พบในงานการตัด ทั้งนี้อันเนื่องมาจากความต้องการใช้วัสดุก่อสร้างเชิงเส้นจำนวนมากและหลากหลายประเภท โดยเฉพาะวัสดุที่สำคัญคือเหล็กเส้นที่หากพิจารณาถึงราคาต่อหน่วยและปริมาณการใช้ในแต่ละโครงการ ก็จะพบว่าค่าวัสดุเชิงเส้นเหล่านี้เป็นสัดส่วนสำคัญในราคารวมของโครงการ อย่างไรก็ตามการแก้ปัญหาการตัดวัสดุเชิงเส้นเพื่อให้ได้แผนการตัดที่มีประสิทธิภาพดีเป็นงานที่ต้องใช้ความรู้และการคำนวณที่ซับซ้อน หรือจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการหาคำตอบที่ดี จึงทำให้การปฏิบัติงานที่เป็นอยู่ซึ่งมักจะใช้การประมาณการด้วยผู้ทำงานเองและเกิดปริมาณเศษการตัดเป็นจำนวนมากและเป็นการเพิ่มต้นทุนของโครงการก่อสร้าง

มีงานวิจัยที่ผ่านมาจำนวนมากมายได้มุ่งพัฒนาเทคนิคในการแก้ปัญหาการตัดและหาคำตอบที่ดีที่สุด เนื่องจากปัญหานี้เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นกับหลากหลายอุตสาหกรรมการผลิต รวมถึงอุตสาหกรรมก่อสร้างด้วย หากสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ก็จะทำให้นำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างมากได้ อย่างไรก็ตามแบบจำลองของปัญหาการตัดนี้เป็นประเภท NP-hard (nondeterministic polynomial-time hard) หรือปัญหาที่ยากต่อการหาคำตอบ จนกระทั่งได้มีแนวคิดในการหาคำตอบแบบ pattern-based approach และใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Delayed Pattern Generation จึงทำให้มีแนวทางที่มีประสิทธิภาพดีในการหาคำตอบที่ดีที่สุด นอกจากนี้การวิจัยที่ผ่านมาอีกกลุ่มยังมุ่งพัฒนาตัวแบบจำลองปัญหาให้พิจารณากับเงื่อนไขที่หลากหลาย รวมทั้งประเด็นความต่อเนื่องในงานการตัดที่จะช่วยลดแรงงานและพื้นที่ในการทำงานได้ ซึ่งสอดคล้องกับสภาพของงานก่อสร้างเนื่องจากวัสดุก่อสร้างมักมีน้ำหนักมากและใช้พื้นที่กองเก็บมาก แต่งานวิจัยที่ผ่านมาเหล่านี้ยังขาดการศึกษาความสัมพันธ์ของลักษณะคละของรายการความต้องการ (demand assortment) ที่มีต่อปริมาณเศษการตัด ทั้งนี้เนื่องจากงานการตัดวัสดุก่อสร้างคงคลังมักมีความหลากหลายขึ้นกับทั้งประเภทของสิ่งก่อสร้าง ขนาดและชิ้นส่วนของสิ่งก่อสร้าง จึงทำให้โจทย์ปัญหาการตัดวัสดุก่อสร้างมีลักษณะคละได้ต่าง ๆ กัน

งานวิจัยนี้จึงได้เสนอการสร้างแบบจำลองปัญหาการตัดและปัญหาความต่อเนื่องในการตัด พร้อมทั้งพัฒนาวิธีการหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพ จากนั้นจึงนำมาใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ของ

ลักษณะคละของรายการความต้องการ (demand assortment) ที่มีต่อปริมาณเศษการตัด แบบจำลองปัญหาการตัดและปัญหาความต่อเนื่องในการตัดมีลักษณะทั่วไปเป็นแบบจำลองการหาคำตอบที่ดีที่สุด (optimization models) จึงส่วนประกอบหลักของแบบจำลองได้แก่ ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และฟังก์ชันข้อจำกัด ซึ่งส่วนประกอบหลักเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นมาในรูปสมการต่าง ๆ ทางคณิตศาสตร์ ที่เป็นตัวกำหนดลักษณะคำตอบ ใช้ประเมินผลคำตอบ และใช้สร้างขอบเขตจำกัดของคำตอบที่ต้องการ โดยมีรายละเอียดโดยสรุปแยกเป็นแต่ละแบบจำลองดังนี้

แบบจำลองปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้น (1D-CSP) ประกอบด้วย ตัวแปรตัดสินใจ (decision variables) คือ แผนการตัด (cutting plans) ที่กำหนดรูปแบบการตัดที่ใช้ (cutting patterns: P_j) และจำนวนครั้งการตัดซ้ำ (cutting times: X_j) ส่วนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) คือ ผลรวมจำนวนวัสดุคงคลังมาตรฐานที่ต้องใช้ หรือเทียบเท่ากับค่าร้อยละของปริมาณเศษการตัด (*%waste*) และฟังก์ชันข้อจำกัดเป็นเงื่อนไขทั่วไปตามหลักการของปัญหา 1D-CSP โดยใช้วิธีการหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพ ตามแนวทาง pattern-oriented approach ที่สร้างรูปแบบการตัดที่ประสิทธิภาพดีด้วย Intensive Search Algorithm และหาจำนวนครั้งการตัดซ้ำด้วย Delayed Pattern Generation Technique

แบบจำลองปัญหาความต่อเนื่อง (contiguity) มี decision variables เป็น ลำดับของการตัดตามรูปแบบการตัดที่ใช้ (ordering permutations of P_j) และมี objective function เป็นค่าผลรวมจำนวนขนาดความยาวที่ต้องการที่ยังตัดไม่เสร็จ (ω) และใช้วิธีการหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพด้วย Genetic Algorithm

แบบจำลองทั้งสองนี้ถูกนำมาพัฒนาเป็นโปรแกรมในโปรแกรม Microsoft Excel 2013 และใช้ Add-in คือ Solver™ เพื่อช่วยในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของแบบจำลองทั้งสอง ซึ่งมีส่วนประกอบของโปรแกรม 5 ส่วนหลัก รวมกันอยู่ในไฟล์รูปแบบ .xlsx ได้แก่ ส่วนที่นำเข้าข้อมูลโจทย์ ส่วนการคิดคำนวณค่าต่าง ๆ ส่วนที่ควบคุมการทำงานของชุดคำสั่งอัตโนมัติ ส่วนที่ใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุด และส่วนที่แสดงผลคำตอบ

ภายหลังจากที่ได้พัฒนาโปรแกรมของแบบจำลองปัญหาดังกล่าวเสร็จสมบูรณ์แล้วจึงนำไปใช้ในการทดสอบ ซึ่งการทดสอบแบบจำลองการตัด (1D-CSP) มี 3 แบบแผนการทดสอบเพื่อให้ครอบคลุมตัวแปรต่าง ๆ ที่กำหนดลักษณะคละของโจทย์ปัญหาการตัด และมีแบบแผนการทดสอบอีก 1 ชุดที่ใช้สำหรับการทดสอบแบบจำลองความต่อเนื่อง (contiguity) ทั้งนี้ในการทดสอบเหล่านี้จะมีการอ้างอิงเปรียบเทียบกับโจทย์ปัญหาฐาน (Base case) ที่สร้างขึ้นเพื่อจำลองโจทย์ปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นสำหรับงานก่อสร้างทั่วไป โดยกำหนดให้มีขนาดความยาวที่ต้องการที่แตกต่างกันจำนวน 18 ขนาด (m = 18) ซึ่งถูกแบ่งออกเป็นช่วงความยาวต่าง ๆ ที่ต่อเนื่องกัน 6 ช่วง แต่ละช่วงประกอบด้วย 3 ขนาดความยาว แบ่งช่วงเหล่านี้ด้วยอัตราส่วนของขนาดท่อนความยาวที่ต้องการต่อความยาวของวัสดุคงคลัง

(L_i/LS) กำหนดให้ LS = 10.00 เมตร กลุ่มช่วงที่ 1 (G1) คือขนาดท่อนสั้นอย่างมาก (Tiny) หรือ (L_i/LS) = (0.020, 0.100], กลุ่มช่วงที่ 2 (G2) คือขนาดท่อนสั้นมาก (Very short) หรือ (L_i/LS) = (0.100, 0.200], กลุ่มช่วงที่ 3 (G3) คือขนาดท่อนสั้น (Short) มี (L_i/LS) = (0.200, 0.333], กลุ่มช่วงที่ 4 (G4) คือขนาดท่อนยาวปานกลาง (Intermediate) มี (L_i/LS) = (0.333, 0.500], กลุ่มช่วงที่ 5 (G5) คือขนาดท่อนยาว (Long) มี (L_i/LS) = (0.500, 0.714], และกลุ่มช่วงที่ 6 (G6) คือขนาดท่อนยาวมาก (Very long) มี(L_i/LS) = (0.714, 1.000)

ข้อสรุปของผลการทดสอบที่ตอบข้อสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ มีดังต่อไปนี้

แบบแผนการทดสอบชุดที่ 1 ประกอบด้วยชุดทดสอบทั้งสิ้น 37 ชุด ที่มีการปรับแต่งโจทย์ปัญหาให้แตกต่างกัน เพื่อวิเคราะห์ความอ่อนไหวสำหรับค่าตัวแปรจำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i) พบว่าการกระจายของจำนวนท่อนที่ต้องการอย่างสม่ำเสมอ (uniform distribution) ไปในขนาดความยาวที่ต้องการต่าง ๆ จะทำให้เกิดปริมาณเศษการตัดรวมจากแผนการตัดที่ดีที่สุดน้อยกว่าการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอ และสัดส่วน (proportion) การกระจายของจำนวนท่อนที่ต้องการที่มีผลต่อปริมาณเศษการตัดรวม ซึ่งหากจำนวนท่อนที่ต้องการของกลุ่มช่วงความยาวขนาดสั้น ๆ ((L_i/LS) <= 0.200) มีสัดส่วนที่มากกว่าจะช่วยให้ปริมาณเศษการตัดรวมลดลง (น้อยกว่าของโจทย์ฐาน) ได้ แต่ในทางกลับกัน หากจำนวนท่อนที่ต้องการของกลุ่มช่วงความยาวขนาดยาว ((L_i/LS) > 0.500) มีสัดส่วนที่มากกว่าจะทำให้ปริมาณเศษการตัดรวมเพิ่มขึ้น (มากกว่าของโจทย์ฐาน) ทั้งนี้อธิบายได้ว่าเมื่อท่อนความยาวขนาด (L_i/LS) <= 0.200 มีจำนวนที่ต้องการมากกว่ามากเมื่อเทียบกับกลุ่มช่วงอื่น ๆ ก็ยังสามารถจับคู่กันเองเพื่อสร้างรูปแบบการตัดที่มีเศษการตัดน้อย ๆ ได้ จึงไม่ต้องพึ่งพาขนาดท่อนความยาวของกลุ่มช่วงอื่น ๆ ในขณะที่ท่อนความยาว ๆ (L_i/LS) > 0.500 นั้นไม่สามารถจับคู่กันเองได้เพราะจะเกินความยาวมาตรฐาน จำเป็นต้องสร้างรูปแบบการตัดกับท่อนความยาวในกลุ่มช่วงอื่น ๆ ที่สั้นกว่า เพื่อให้เป็นรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้ หากไม่มีกลุ่มช่วงอื่น ๆ ที่สั้นกว่า ก็จะทำให้เกิดเป็นเศษที่มีขนาดยาวมากแทน

แบบแผนการทดสอบชุดที่ 2 ประกอบด้วยชุดทดสอบทั้งสิ้น 54 ชุด ที่มีการปรับแต่งโจทย์ปัญหาให้แตกต่างกัน เพื่อการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่าตัวแปรขนาดความยาวของท่อนความต้องการ (L_i) และจำนวนความต้องการของแต่ละขนาดความยาว (D_i) โดยให้ทุกชุดทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงค่า L_i ของทุกกลุ่มช่วงเสมอ พร้อมกับกำหนดให้มีการคงที่หรือปรับเปลี่ยนค่า D_i ของแต่ละกลุ่มช่วงแตกต่างกันไป มีข้อสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของ L_i และ D_i แบบพร้อม ๆ กันทุกกลุ่มช่วงส่งผลไปในทางที่ทำให้ *%waste* มากขึ้นกว่าการเปลี่ยนแปลงของ L_i แบบคราวละหนึ่งกลุ่มช่วง และมากขึ้นกว่าการไม่เปลี่ยนแปลงของ D_i และยังพบว่าสัดส่วนการกระจายของ D_i ของแต่ละกลุ่มช่วงมีความสัมพันธ์กับ *%waste* โดยหากมีสัดส่วนการกระจายเดียวกันแม้จะมีผลรวมจำนวน D_i มากหรือน้อยต่างกันก็จะทำให้เกิด *%waste* ค่อนข้างใกล้เคียงกัน และหากจำนวนท่อนที่ต้องการของกลุ่มช่วง

ความยาวขนาดสั้น ๆ ((L_i/LS) <= 0.200) มีสัดส่วนที่มากกว่าจะช่วยให้ปริมาณเศษการตัดรวมลดลงได้ แต่ในทางกลับกัน หากจำนวนท่อนที่ต้องการของกลุ่มช่วงความยาวขนาดยาว ๆ ((L_i/LS) > 0.500) มีสัดส่วนที่มากกว่าจะทำให้ปริมาณเศษการตัดรวมเพิ่มขึ้น ซึ่งทั้งสองประการนี้สอดคล้องกับข้อสรุปของแบบแผนการทดสอบที่ 1

แบบแผนการทดสอบชุดที่ 3 ประกอบด้วยชุดทดสอบทั้งสิ้น 35 ชุด ที่มีการปรับแต่งโจทย์ปัญหาให้แตกต่างกัน มีข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวสำหรับค่าตัวแปรจำนวนขนาดท่อนความยาวที่ต่างกัน (*m*) การหายไปของกลุ่มช่วงความยาวขนาดยาว ๆ ((L_i/LS) > 0.500) ทำให้ *%waste* ลดน้อยลง แต่ในทางตรงข้าม การหายไปของกลุ่มช่วงความยาวขนาดสั้น ๆ ((L_i/LS) <= 0.200) ทำให้ *%waste* เพิ่มมากขึ้น และยิ่งเพิ่มมากขึ้นสำหรับการหายไปของกลุ่มช่วงความยาวขนาดกลาง (0.200 < (L_i/LS) <= 0.500) ทั้งนี้อธิบายได้ว่ากลุ่มช่วงความยาวขนาดกลางมีความสำคัญต่อการสร้างรูปแบบการตัดที่เกิดเศษการตัดน้อย เพราะสามารถไปจับกลุ่มได้กับทั้งกลุ่มช่วงขนาดสั้นและขนาดยาว โดยมีลักษณะเชื่อมโยงและเติมเต็มให้ได้รูปแบบการตัดที่ดี แต่เมื่อกลุ่มช่วงขนาดสั้นกับยาวกับคู่กันเองสร้างเป็นรูปแบบการตัดก็ยังไม่สามารถเติมเต็มให้ได้รูปแบบการตัดที่มีเศษน้อยได้ เนื่องจากกลุ่มช่วงขนาดสั้นก็สั้นเกินไป และกลุ่มช่วงขนาดยาวก็ยาวเกินไป ข้อสรุปสำคัญอีกประการที่ได้จากแบบการทดสอบนี้คือ ที่ขนาดค่าตัวแปร *m* ที่เท่ากัน การหายไปของขนาดความยาวทั้งกลุ่มช่วงจะส่งผลให้เกิด *%waste* เพิ่มขึ้น (สำหรับกลุ่มช่วง Tiny, Very short, Short, และ Intermediate) หรือลดลง (สำหรับกลุ่มช่วง Long, และ Very long) มากกว่าการหายไปของขนาดความยาวแบบกระจายไปทุกกลุ่มช่วง ชี้ให้เห็นถึงลักษณะของการสร้างรูปแบบการตัดที่ดีนั้นต้องอาศัยการเติมเต็มร่วมกันจากขนาดความยาวหลาย ๆ กลุ่มช่วง

แบบแผนการทดสอบชุดที่ 4 ประกอบด้วยชุดทดสอบทั้งสิ้น 6 ชุด ที่มีคัดเลือกมาจากชุดทดสอบของแบบแผนการทดสอบทั้ง 3 แบบแผน ที่ใช้แผนการตัดแย่ที่สุดและดีที่สุดอย่างละ 2 ชุดทดสอบ รวมเป็น 4 ชุดทดสอบ และใช้โจทย์ปัญหาฐานและที่ปรับเปลี่ยนค่า D_i แบบสุ่มเป็นอีก 2 ชุดทดสอบ ทำให้ได้การปรับแต่งโจทย์ปัญหาให้แตกต่างกันทั้ง 6 ชุดทดสอบ โดยมีข้อสรุปคือ แผนการตัดที่ให้ค่า *%waste* สูงจะมีค่า *nDiffPat* ที่น้อยกว่า (รูปแบบการตัดไม่หลากหลาย) และสามารถปรับปรุงค่าความต่อเนื่องของการตัดจากคำตอบของแบบจำลองปัญหานี้ได้มากกว่า ส่วนแผนการตัดที่มีค่า *nDiffPat* ที่น้อยกว่า จะมีค่า ω *Before* น้อยกว่า (มีความต่อเนื่องของการตัดมากกว่า) และจะสามารถปรับปรุงให้ได้สัดส่วน (ω *After*/ ω *Before*) ที่น้อยกว่าได้ (หรือสามารถปรับปรุงได้มากกว่านั่นเอง) ข้อสรุปจากแบบแผนการทดสอบนี้ชี้ให้เห็นว่า จำนวนรูปแบบการตัดที่ใช้ในแผนการตัด (*nDiffPat*) ส่งผลอย่างมากต่อความต่อเนื่องของงานการตัดวัสดุ แผนการตัดที่ใช้ *nDiffPat* น้อยจะมีความต่อเนื่องที่ดีกว่าตั้งแต่เริ่มต้นและสามารถปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้นอีกได้มากกว่าด้วยการ optimization ดังนั้นหากคำตอบแผนการตัดใดที่ให้ปริมาณเศษการตัดเท่ากันก็ควรเลือกแผนการตัดที่มี *nDiffPat* น้อยที่สุดในการนำไปปฏิบัติงานเพราะจะเกิดความต่อเนื่องมากกว่า

ผลการทดสอบของทั้ง 4 แบบแผน รวมทั้งสิ้น 132 ชุดทดสอบ (แต่ละชุดทดสอบทำการปรับเปลี่ยนโจทย์แบบสุ่มตามเงื่อนไขที่กำหนดแล้วทดสอบซ้ำเป็นจำนวน 100 ครั้ง) ชี้ให้เห็นว่าลักษณะคละของโจทย์ปัญหาการตัดส่งผลต่อปริมาณเศษการตัดที่จะเกิดขึ้นและยังส่งผลต่อความต่อเนื่องในงานการตัดด้วย ประโยชน์ที่ได้จากความรู้ความเข้าใจที่เป็นผลของโครงการวิจัยนี้จะทำให้สามารถนำไปใช้จัดเซ็ตหรือล็อตของงานการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นให้เกิดลักษณะคละของโจทย์ในแบบที่จะทำให้เกิดเศษการตัดน้อย ๆ และมีความต่อเนื่องมาก ๆ ได้ โดยกลยุทธ์การจัดล็อตของงานการตัดควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

1. รายการความต้องการควรประกอบด้วย ขนาดท่อนความยาว (L_i) ที่หลากหลายกลุ่มช่วง ให้ครอบคลุมทั้ง 6 กลุ่มช่วง คือ G1 = (0.020, 0.100], G2 = (0.100, 0.200], G3 = (0.200, 0.333], G4 = (0.333, 0.500], G5 = (0.500, 0.714], G6 = (0.714, 1.000) โดยให้มีจำนวนท่อนที่ต้องการ (D_i) ของแต่ละขนาดความยาวในสัดส่วนที่ค่อนข้างสม่ำเสมอกันที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ จะทำให้ได้แผนการตัดที่ดีที่สุดที่ให้ปริมาณเศษการตัดน้อย ๆ ได้

2. หากไม่สามารถจัดล็อตให้รายการความต้องการกระจายแบบสม่ำเสมอได้ ควรระวังรายการความต้องการในกลุ่มช่วง G5 และ G6 (โดยเฉพาะ G5) เนื่องจากกลุ่มช่วงเหล่านี้ไม่สามารถรวมกันเองภายในกลุ่มหรือระหว่างทั้งสองกลุ่มนี้ เพื่อสร้างรูปแบบการตัดที่มีเศษน้อย ๆ ได้ (เช่น G5+G5 หรือ G5+G6 หรือ G6+G6 ไม่ได้เพราะเกินขนาดของ *LS*) แต่ต้องอาศัยการรวมกับขนาดความยาวของกลุ่มช่วงอื่น ๆ ที่สั้นกว่าเสมอ ดังนั้นหากรายการความต้องการใดประกอบด้วยขนาดความยาวในกลุ่มช่วง G5 และ G6 อยู่เป็นจำนวนมาก แต่กลับต้องการขนาดความยาวกลุ่มอื่น ๆ เป็นจำนวนน้อย จะเป็นลักษณะล็อตการตัดที่ทำให้เกิดเศษการตัดปริมาณมากมายได้ จึงควรจัดล็อตการตัดใหม่ให้มีขนาดความยาวใน G5 และ G6 จำนวนน้อยกว่า G1, G2, G3, และ G4 อยู่เสมอ ยิ่งน้อยกว่ามากยิ่งดี เพื่อให้มีขนาดท่อนสั้น ๆ ที่เพียงพอสำหรับรวมกับ G5 และ G6 เป็นรูปแบบการตัดที่มีเศษน้อย

3. จำนวนขนาดท่อนความยาวที่ต่างกัน (m) มากหรือน้อยไม่ส่งผลต่อปริมาณเศษการตัดที่ได้โดยตรง แต่หากมีค่า m น้อยเกินไปจนทำให้รายการความต้องการไม่สามารถครอบคลุมขนาดความยาวได้ครบทุกกลุ่มช่วง ทำให้ขาดหรือขาดแคลนขนาดความยาวในบางกลุ่มช่วงหรือหลายกลุ่มช่วงก็จะส่งผลไปเพิ่มปริมาณเศษการตัดได้ในที่สุด โดยเฉพาะหากขาดแคลนขนาดความยาวในกลุ่มช่วง G3 และ G4 ที่สามารถไปรวมกับขนาดกลุ่มอื่น ๆ ได้ดี

4. การสร้างแผนการตัดที่ดีจากการ optimization ของล็อตการตัดหนึ่งอาจมีได้หลากหลายแผนที่ให้ค่าปริมาณเศษการตัดดีเทียบเท่ากัน (equivalent cutting plans) ให้เลือกแผนการตัดที่มีรูปแบบการตัดที่ใช้ (*nDiffPat*) น้อยกว่า เพราะจะส่งผลต่อการจัดลำดับการตัดให้มีความต่อเนื่องได้ดีกว่า

ซึ่งการจัดล็อตการตัดตามกลยุทธ์เหล่านี้จะเป็นการลดปริมาณเศษจากงานการตัดอีกแนวทางหนึ่งที่นอกเหนือจากการสร้างแผนการตัดที่ดีที่สุดจากการ optimization และเมื่อได้แผนการตัดที่ดีที่สุดแล้วก็ควรนำมาทำการจัดลำดับการตัดตามรูปแบบการตัดเพื่อให้เกิดความต่อเนื่องมากที่สุด ซึ่งจะช่วยประหยัดต้นทุนค่าแรงงาน และพื้นที่ในการทำงานได้อีกด้วย

5.2 ข้อจำกัด

ข้อจำกัดของแบบจำลองปัญหา 1D-CSP และแบบจำลองปัญหา contiguity ส่วนหนึ่งเป็นข้อจำกัดที่เกิดขึ้นจากโปรแกรม Microsoft Excel 2013 และโปรแกรม Solver ความเร็วในการคำนวณด้วยฟังก์ชันพื้นฐานที่มีอยู่ของโปรแกรม Microsoft Excel 2013 มีสูง แต่กลับพบว่าการคำนวณในกระบวนการหาคำตอบที่ดีที่สุดของโปรแกรม Solver บางครั้งมีความเร็วต่ำหรือต่ำมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยากของโจทย์ของชุดทดสอบต่าง ๆ บางโจทย์อาจสร้างแผนการตัดที่ดีได้ยากมากจึงใช้เวลาในการหาคำตอบมาก (ประมาณ 15 นาทีต่อหนึ่งโจทย์) หรือในบางครั้งก็ทำให้โปรแกรมไม่ตอบสนอง (non-responding)

ข้อจำกัดของการประเมินแผนการตัดที่ดีด้วยค่าร้อยละของปริมาณเศษการตัด (%waste) ซึ่งคำนวณจาก ค่าร้อยละของปริมาณเศษการตัดรวมต่อปริมาณความยาวรวมของรายการความต้องการ เนื่องจากในการทดสอบตามชุดการทดสอบต่าง ๆ จะมีการปรับเปลี่ยนค่าของโจทย์ปัญหา (หรือก็คือรายการความต้องการ) อยู่ตลอดเวลาทุกครั้ง จึงทำให้ปริมาณความยาวรวมของรายการความต้องการที่คำนวณได้จาก $\sum_{i=1}^{m}(L_i \cdot D_i)$ มีค่าที่ไม่เท่าเดิมในแต่ละครั้งของการหาคำตอบและแต่ละชุดการทดสอบ หากจะเปรียบเทียบผลคำตอบระหว่างชุดการทดสอบใด ๆ จึงต้องใช้ปริมาณเศษการตัดที่เทียบเป็นค่าร้อยละแล้ว รวมทั้งปริมาณเศษการตัดก็คำนวณจาก $\left(\sum_{j=1}^{n}(LS \cdot X_j) - \sum_{i=1}^{m}(L_i \cdot D_i)\right)$ ผลต่างระหว่างปริมาณวัสดุคงคลังที่ใช้ไปทั้งหมดกับปริมาณความยาวรวมของรายการความต้องการ ซึ่งทำให้ปริมาณเศษที่คำนวณได้หมายรวมถึงท่อนวัสดุที่มีความยาวเหลืออยู่มากแต่ตัดออกมาเกินกว่าความต้องการแล้ว ในขณะที่ในบางงานวิจัยได้กำหนดนิยามของปริมาณเศษการตัดจากขนาดความยาวของท่อนที่เหลือจากการตัดด้วย เช่น หากยังยาวกว่า 2.00 เมตร จะถูกแยกเก็บไว้ไม่นับเป็นเศษเพื่อรอนำกลับมาใช้ใหม่ในล็อตการตัดหน้า แต่การกำหนดนิยามเช่นนี้ก็อาจทำให้เกิดความไม่ยุติธรรมในการเปรียบเทียบผลคำตอบระหว่างชุดการทดสอบต่าง ๆ ได้ เพราะไม่ได้พิจารณาภายใต้ขอบเขตของล็อตการตัดเพียงล็อตเดียวเท่านั้น

ข้อจำกัดของการทดสอบแบบจำลองมาจากการแบ่งกลุ่มช่วงของขนาดความยาวท่อนที่ต้องการออกเป็น 6 ช่วง ได้แก่ G1 = Tiny, G2 = Very short, G3 = Short, G4 = Intermediate, G5 = Long, และ G6 = Very long ซึ่งมีผลต่อการออกแบบชุดการทดสอบและข้อสรุปที่ได้ในการวิจัยนี้

เป็นอย่างมาก หากการกำหนดแบ่งกลุ่มช่วงเป็นแบบอื่นอาจให้ข้อสรุปที่ต่างออกไปบ้าง อย่างไรก็ตามควรจะยังคงมีลักษณะแนวโน้มของข้อสรุปที่สอดคล้องกันกับการวิจัยนี้ได้

ข้อจำกัดของการจัดชุดการทดสอบ เนื่องจากลักษณะคละของโจทย์ปัญหาการตัดขึ้นกับค่าตัวแปรจำนวนมาก และตัวแปรเหล่านี้ก็สามารถมีค่าต่าง ๆ ได้หลากหลายในช่วงค่าที่กว้าง เช่น D_i และ m อาจจะเป็นเลขจำนวนเต็มใด ๆ ดังนั้นการออกแบบชุดการทดสอบให้ครอบคลุมความเป็นไปได้ทั้งหมดไม่สามารถเป็นไปได้ จึงยังอาจมีรูปแบบการปรับแต่งค่าตัวแปรต่าง ๆ ของโจทย์ปัญหาได้อีกมากมายหลากหลายรูปแบบที่ไม่ได้รวมไว้ในการทดสอบของการวิจัยนี้ อย่างไรก็ตามแบบแผนการทดสอบและชุดการทดสอบที่ใช้ในการวิจัยนี้ก็มีเป็นจำนวนมากและถูกออกแบบอย่างรัดกุมเพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ตรงประเด็นและสามารถยืนยันแนวโน้มที่เป็นได้โดยไม่ต้องทำการทดสอบเพิ่มต่อไปอีก

5.3 ข้อเสนอแนะ

ลักษณะคละของโจทย์ปัญหาการตัดเกี่ยวข้องกับตัวแปรหลายตัวที่สัมพันธ์กัน จึงทำให้สามารถออกแบบชุดการทดสอบได้หลากหลายมาก ซึ่งในการวิจัยนี้ก็ได้ทำการออกแบบแบบแผนการทดสอบและชุดการทดสอบต่าง ๆ ให้หลากหลายที่สุดและครอบคลุมที่สุดเท่าที่จำเป็นเพื่อให้ได้ข้อสรุปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ก่อนหน้า อย่างไรก็ตามข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไปนั้นสามารถทำได้ด้วยการตั้งสมมติฐานอื่น ๆ เพิ่มเติม แล้วจึงออกแบบชุดทดสอบที่เหมาะสม ซึ่งยังมีความเป็นไปได้อีกมากเพื่อให้เกิดเป็นข้อสรุปที่มีประโยชน์อื่น ๆ ที่สามารถนำไปใช้สำหรับงานการตัดได้ต่อไป ยกตัวอย่างเช่นการพิจารณาแบ่งกลุ่มช่วงความยาวของขนาดความยาวที่ต้องการให้แตกต่างออกไปจากการวิจัยนี้

รูปลักษณ์ของแบบจำลองปัญหาการตัด 1D-CSP และปัญหาความต่อเนื่อง Contiguity นั้นเป็นไปเพื่อการวิจัย ยังคงมีส่วนติดต่อกับผู้ใช้ (User interface) ที่ไม่สวยงามเหมือนกับที่โปรแกรมสำเร็จรูปควรจะเป็น โดยเฉพาะไม่มีส่วนการแสดงผลลัพธ์เป็นรูปกราฟ หรือกราฟิกต่าง ๆ อย่างไรก็ตามการวิจัยต่อไปอาจเลือกที่จะพัฒนาโปรแกรมสร้างแผนการตัดวัสดุคงคลังนี้ให้สวยงามและสะดวกต่อการใช้งานต่อไป

5.4 ผลลัพธ์

การวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการวิจัยในการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ 2 บทความ และตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ จำนวน 1 บทความ มีรายละเอียดดังนี้

Benjaoran, V., Sooksil, N. and Metham M. (2015) “Demanded Numbers of Construction Steel Bars Affecting Cutting Loss” The Third International Conference on Civil Engineering, Architecture and Sustainable Infrastructure (ICCEASI 2015), 1 – 3 July 2015, Hong Kong.

สุวิชชา สมบุญ และ วชรภูมิ เบญจโอฬาร (2558) “การสำรวจอัลกอริทึมการจัดลำดับการตัดเหล็กเส้นของวิศวกรและช่างเหล็ก (Survey of the rebar cutting-pattern algorithm of engineers and steel workers)” วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, ฉบับที่ 1 ปีที่ 8 ประจำเดือน มกราคม – มิถุนายน 2558

สุวิชชา สมบุญ และ วชรภูมิ เบญจโอฬาร (2555) “ศึกษาการจัดลำดับการตัด – ดัดเหล็กเส้นของช่างเหล็กในโครงการก่อสร้าง (The study of bar cutting-bending in construction projects)” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17 (NCCE17), 9-11 พฤษภาคม 2555, อุดรธานี.

เอกสารอ้างอิง

Benjaoran, V. and Bhokha, S. 2013. “Cutting pattern generation for reinforcement bars using Intensive Search Algorithm.” *The Thirteenth East Asia-Pacic Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13)*, September 11-13, 2013, Sapporo, Japan.

Bradley, Stephen P., Arnoldo C. Hax, and Thomas L. Magnanti. 1977. *Applied Mathematical Programming*. Reading, Mass: Addison-Wesley.

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.

Cherri, Adriana Cristina, Marcos Nereu Arenales, Horacio Hideki Yanasse, Kelly Cristina Poldi, and Andréa Carla Gonçalves Vianna. 2014. “The One-Dimensional Cutting Stock Problem with Usable Leftovers – A Survey.” *European Journal of Operational Research* 236 (2): 395–402. doi:10.1016/j.ejor.2013.11.026.

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): 145–59.

Gilmore, P. C, and R. E Gomory. 1961. “A Linear Programming Approach to the Cutting-Stock Problem.” *Operations Research* 9 (6): 849–59.

Gilmore, P. C, and R. E Gomory. 1963. “A Linear Programming Approach to the Cutting Stock Problem-Part II.” *Operations Research* 11 (6): 863–88.

Gradisar, Miro, Joze Jesenko, and Gortan Resinovic. 1997. “Optimization of Roll Cutting in Clothing Industry.” *Computers & Operations Research* 24 (10): 945–53. 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): 557–68. 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): 509–21. doi:16/j.ejor.2004.12.019.

Gupta, J. N.D, and J. C Ho. 1999. "A New Heuristic Algorithm for the One-Dimensional Bin-Packing Problem." *Production Planning & Control* 10 (6): 598–603.

Haessler, R. W, and P. E Sweeney. 1991. "Cutting Stock Problems and Solution Procedures." *European Journal of Operational Research* 54 (2): 141–50.

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.

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): 1641–59. 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): 701–11. doi:16/j.ejor.2009.03.042.

Riehme, Jan, Guntram Scheithauer, and Johannes Terno. 1996. "The Solution of Two-Stage Guillotine Cutting Stock Problems Having Extremely Varying Order Demands." *European Journal of Operational Research* 91 (3): 543–52. doi:10.1016/0377-2217(95)00200-6.

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.

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): 1109–30. 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): 1353–70. doi:16/j.ejor.2005.09.054.

ภาคผนวก ตัวอย่างผลคำตอบของการทดสอบแบบจำลอง

รูปภาพตารางต่อไปนี้คือโจทย์ปัญหาการตัดของการทดสอบแบบแผนการทดสอบชุดที่ 4 ชุดการทดสอบที่ 5 ในแต่ละครั้งรวมทั้งสิ้น 100 ครั้ง ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนอย่างสุ่มค่า L_i และ D_i ในแต่ละครั้ง โดยให้ได้สัดส่วนจำนวนที่ต้องการรวมของแต่ละกลุ่มช่วง (G1:G2:G3:G4:G5:G6) เป็น 160:40:40:40:40:40 ตามลำดับ รวมทั้งผลการคำตอบเป็น แผนการตัดคำตอบที่ดีที่สุด (optimal cutting plans) ของแบบจำลองปัญหาการตัด 1D-CSP (ซึ่งแผนการตัดประกอบด้วย เซตของรูปแบบการตัด (P_j : A_{ij}) และจำนวนครั้งการตัดซ้ำ (X_j)) และลำดับการตัดที่ดีที่สุดตามรูปแบบการตัด (optimal cutting sequences) ของแบบจำลองปัญหาความต่อเนื่อง contiguity (ซึ่งตัดตามลำดับของ *J*) นอกจากนี้ยังแสดงค่าผลลัพธ์ต่าง ๆ ที่ใช้ประเมินแผนการตัดและลำดับการตัด ได้แก่ ω *After*, ω *Before*, *Sum(T_j)*, *Sum(L_i·OS_i)*, *Total Waste*, *%waste*, *Sum(X_j)*, Dice Method, *Sum(W_j)*, และ *nDiffPat*

Run no.	52				*J*	2	12	22	7	4	18	23	20	10	6	13	19	3	16	15	5	21	1	14	11	8	17	9	24
w Before	203	*i*	*Li*	*Di*	*Xj*	19	10	16	2	1	3	2	2	1	2	1	1	10	1	1	1	1	2	11	2	10	1	4	
w After	108	1	0.48	56	*Pj: Aij*	1	1	1	1	2	1			1			1		1	1							2		
Sum(Tj)	7.35	2	0.82	65					1		7	3	4	9	6					1	1	1						1	
Sum(Li·OSi)	5.62	3	0.99	39				1					1	1		1	2		1				3			1			
Total Waste	12.97	4	1.12	4										1											2				
%waste	1.263	5	1.20	8											1							1			1			1	
Sum(Xj)	104	6	1.64	28					1							2		1	1						4		1	1	
Dice Method	2	7	2.34	11																		1		1					
Sum(Wj)	91	8	2.54	10			1																						
nDiffPat	23	9	3.15	19														1			1							2	
		10	3.38	13						1									2							1			
		11	3.78	14							1													1					
		12	3.85	13											1									1					
		13	5.15	10														1											
		14	5.63	16						1			1			1					1	1				1			
		15	6.96	14			1		1														1						
		16	7.40	4								1					1										1		
		17	8.43	17				1												1									
		18	9.39	19		1																							

Run no.	2				*J*	1	12	19	14	2	18	3	16	6	17	8	7	11	9	5	15	13	10	4	20	21	22	23	24
w Before	104	*i*	*Li*	*Di*	*Xj*	6	16	2	24	1	14	1	8	10	1	1	4	1	8	1	1	1	3	3					
w After	49	1	0.51	66	*Pj: Aij*		4									1		2					1						
Sum(Tj)	13.23	2	0.54	6																	4	1	1						
Sum(Li·OSi)	8.11	3	0.92	88			1			1	1	3	1			1		8	2				7						
Total Waste	21.34	4	1.25	9								2	1																
%waste	2.055	5	1.60	13						1					5	1		1		4		1							
Sum(Xj)	106	6	1.87	18											1		4							1					
Dice Method	2	7	2.27	15				2											1					1					
Sum(Wj)	89	8	2.32	15								2		1		3													
nDiffPat	19	9	2.51	10													1						1	1					
		10	3.35	3																				1					
		11	3.60	16						1	1									1									
		12	3.83	21						1				2															
		13	5.46	16				1			1																		
		14	5.89	8															1										
		15	7.02	16			1																						
		16	7.82	10									1								1	1							
		17	9.51	24					1																				
		18	9.97	6		1																							

Run no.	51				*J*	3	19	17	11	8	4	16	15	7	1	18	10	12	20	14	5	9	13	6	2	21	22	23	24
w Before	148	*i*	*Li*	*Di*	*Xj*	1	4	9	4	1	14	2	7	9	2	3	1	4	3	3	1	20	9	1	1				
w After	83	1	0.40	36	*Pj: Aij*		1			1		1						6	1		1				1				
Sum(Tj)	8.53	2	0.48	41							1					1				1	1	1							
Sum(Li·OSi)	0	3	0.76	83				1	1	2			1				2	10		2				13					
Total Waste	8.53	4	1.29	17					1								2				1		1		1				
%waste	0.869	5	1.66	20																		1							
Sum(Xj)	99	6	1.74	3												1													
Dice Method	2	7	2.44	4															1						1				
Sum(Wj)	92	8	2.79	14		1						2											1						
nDiffPat	20	9	3.05	22		1							3																
		10	3.58	0																									
		11	3.98	29			1			2	1			1															
		12	3.99	11		1						1			1					2									
		13	5.53	18			1				1																		
		14	5.82	18										1									1						
		15	5.85	4											1		1								1				
		16	7.16	3															1										
		17	7.77	28					1							1					1	1							
		18	9.11	9				1																					

Run no.	1				*J*	10	12	3	9	16	14	8	7	1	6	18	17	11	13	15	4	5	2	19	20	21	22	23	24
w Before	133	*i*	*Li*	*Di*	*Xj*	17	14	1	4	2	13	3	5	1	3	2	7	1	9	9	3	2	1						
w After	72	1	0.45	31	*Pj: Aij*		1	1				2		1						1									
Sum(Tj)	2.32	2	0.55	90		1		1	1	1				8	2	3		8		3	3	1							
Sum(Li·OSi)	3.92	3	0.87	39							1	1	2		1		1				1								
Total Waste	6.24	4	1.22	18		1																	1						
%waste	0.647	5	1.28	3												1							1						
Sum(Xj)	97	6	1.58	19							1					1		2				1							
Dice Method	2	7	2.39	12															1		1								
Sum(Wj)	80	8	2.41	10														1		1									
nDiffPat	18	9	2.75	18			1			2																			
		10	3.68	9															1										
		11	3.92	18					1	1									1			2							
		12	3.99	13											2		1												
		13	5.09	11										1			1				1								
		14	5.48	15					1							1				1									
		15	6.80	14			1																						
		16	7.49	14							1												1						
		17	8.22	25		1						1	1																
		18	8.98	1				1																					

Run no.	100				J	6	4	2	9	10	8	11	5	7	12	13	16	17	15	1	14	3	18	19	20	21	22	23	24
w Before	89	i	Li	Di	Xj	5	6	15	4	14	25	2	9	1	3	1	3	8	1	5	1	2							
w After	56	1	0.30	86	Pj: Aij	1	2	2	2	1			1	2			1				3								
Sum(Tj)	4.12	2	0.36	33							1				2	2													
Sum(Li·OSi)	4.31	3	0.81	41						1		1	1				1	1		1									
Total Waste	8.43	4	1.28	20		2						2				1			1		2	1							
%waste	0.809	5	1.42	8					2																				
Sum(Xj)	105	6	1.43	12			2																						
Dice Method	2	7	2.13	7																1		1							
Sum(Wj)	93	8	2.24	11													1	1											
nDiffPat	17	9	2.68	22									2	1	1														
		10	3.52	10									1			1													
		11	4.31	1															2										
		12	4.41	29						2						1													
		13	6.54	22			1		1			1		1	1		1				1	1							
		14	6.94	8														1											
		15	7.06	10		1														1									
		16	8.11	0																									
		17	9.36	15				1																					
		18	9.61	25							1																		

Run no.	99				J	2	9	11	3	7	18	13	16	19	20	15	17	8	4	5	6	21	12	14	10	1	22	23	24
w Before	156	i	Li	Di	Xj	28	10	9	1	2	7	2	1	3	1	5	1	3	6	1	1	6	9	4	2	2			
w After	81	1	0.64	68	Pj: Aij		1	1	1	6		1				2	3		2				1						
Sum(Tj)	6.65	2	0.72	21									1		1			1		2	1	1		2					
Sum(Li·OSi)	6.11	3	0.78	71		1					1								2			4							
Total Waste	12.76	4	1.08	12									2				1			1					3	1			
%waste	1.242	5	1.31	17														2		1	2		1						
Sum(Xj)	104	6	1.88	11								1											1						
Dice Method	2	7	2.22	33					3		1	1	2								3			2		4			
Sum(Wj)	88	8	2.58	3														1											
nDiffPat	21	9	2.68	4					1				1												1				
		10	4.08	17				1										1						1	1				
		11	4.67	20			2																						
		12	4.75	3										1															
		13	5.25	14				1				1		1															
		14	6.15	18						1										1		1	1						
		15	6.97	8							1						1												
		16	7.16	6															1										
		17	8.70	5												1													
		18	9.04	29		1									1														

Run no.	98				J	21	2	9	14	13	11	22	20	16	15	19	8	17	18	12	6	4	10	7	5	1	23	3	24
w Before	176	i	Li	Di	Xj	10	1	1	9	1	14	1	1	3	14	3	3	4	6	4	1	5	2	8	2	3	2	2	
w After	104	1	0.35	47	Pj: Aij					1	1			2		1				4				1					
Sum(Tj)	2.67	2	0.36	30					1	1					1		2												
Sum(Li·OSi)	5.73	3	0.82	83			3						1			2	2	1	2			4		3	1	1	1		
Total Waste	8.4	4	1.30	10		1				1																			
%waste	0.847	5	1.42	24		1						3										1	1					2	
Sum(Xj)	100	6	1.68	6										1												1			
Dice Method	2	7	2.04	1																	1						1		
Sum(Wj)	68	8	2.64	19						3			2			1			1		1		2						
nDiffPat	23	9	3.30	20														1		1			1	1			1		
		10	3.33	5				3																			1	
		11	3.82	13									1				2								1		1	1	
		12	3.89	22											1									1					
		13	5.30	15												1				1	1	1			1				
		14	5.69	10														1	1										
		15	5.74	15								1			1														
		16	7.26	10		1																							
		17	7.46	7			1							1												1			
		18	9.64	23					1		1																		

Run no.	97				J	1	17	5	12	21	19	15	9	20	2	18	16	22	7	8	6	3	13	11	4	14	10	23	24
w Before	175	i	Li	Di	Xj	24	1	3	1	14	2	1	8	10	1	3	1	2	2	3	4	2	5	5	9	5	5		
w After	87	1	0.41	72	Pj: Aij	1	1	1	1	1	1		1		1		3	1							1		1		
Sum(Tj)	9.7	2	0.89	20								2											1		1		1		
Sum(Li·OSi)	2.99	3	0.93	68			1							2			2			1	1		1	2	2	1			
Total Waste	12.69	4	1.07	10																						2			
%waste	1.156	5	1.69	15								1		1										1					
Sum(Xj)	111	6	1.73	15			1														1		2						
Dice Method	2	7	2.35	13							2										1						1		
Sum(Wj)	97	8	2.45	20												1		2		1	2	1							
nDiffPat	22	9	2.67	7												1			2										
		10	4.63	19					2				1		2				1				1						
		11	4.68	8				1								1		1											
		12	4.88	13				1			1		1																	
		13	6.35	16								1		1													1		
		14	6.44	8															1				1					
		15	6.84	16			1										1								1	1			
		16	7.47	2																	1								
		17	9.32	14						1																				
		18	9.57	24		1																							

Run no.	96				J	8	3	10	7	18	14	19	16	5	13	17	20	15	21	11	12	6	9	2	1	4	22	23	24
w Before	128	i	Li	Di	Xj	5	2	5	18	17	1	1	1	4	1	1	9	3	5	3	8	4	3	11	5	3			
w After	69	1	0.35	92	Pj: Aij			1				1	1		3	14		8					3		6	3			
Sum(Tj)	7.31	2	0.47	29		1					1			1						1	2									
Sum(Li·OSi)	8	3	0.81	39						1					3								1	1	1				
Total Waste	15.31	4	1.65	21																					2		1			
%waste	1.411	5	1.65	8																		2								
Sum(Xj)	110	6	1.86	11								2							1			1								
Dice Method	2	7	2.28	8															1				1							
Sum(Wj)	98	8	2.47	6																1						1			
nDiffPat	21	9	3.21	26				3				1		2						1								
		10	4.53	5							1			1																
		11	4.83	17							1						1					1				1			
		12	5.00	18			2							1		1	1												
		13	5.81	28								1							1		1		1	1					
		14	6.33	1									1																
		15	7.06	11														1		1					1			
		16	9.14	17						1																				
		17	9.45	5		1																							
		18	9.91	18					1																					

Run no.	95				J	3	10	15	11	9	13	2	5	8	12	1	6	14	7	4	16	17	18	19	20	21	22	23	24
w Before	78	i	Li	Di	Xj	19	1	2	20	1	10	1	3	5	8	10	6	8	5	4									
w After	34	1	0.32	43	Pj: Aij						1		3			2				2									
Sum(Tj)	2.16	2	0.48	38			1				2		4	1															
Sum(Li·OSi)	9.08	3	0.75	79		1				3	2		1				3	2												
Total Waste	11.24	4	1.45	6													1											
%waste	1.103	5	1.56	14			6											1	1											
Sum(Xj)	103	6	1.59	20											2					1									
Dice Method	2	7	2.54	15										1		1													
Sum(Wj)	88	8	2.77	21					1			1																		
nDiffPat	15	9	2.79	4																1									
		10	3.61	27							2	2							1										
		11	4.82	5															1										
		12	4.98	8				2												1									
		13	6.28	9									1				1												
		14	6.81	18											1	1													
		15	6.93	13										1				1												
		16	7.22	20					1																				
		17	7.75	1						1																			
		18	9.21	19		1																							

Run no.	50				J	7	2	4	21	16	15	13	1	6	18	10	11	17	3	9	12	5	19	8	20	14	22	23	24
w Before	173	i	Li	Di	Xj	1	1	8	13	2	8	2	8	3	10	1	1	12	7	3	1	1	12	7	1	2			
w After	59	1	0.57	19	Pj: Aij			2								3													
Sum(Tj)	13.37	2	0.61	96		5	1		2		4				1	4		1		2	3								
Sum(Li·OSi)	2.77	3	0.94	45				1		1			2		1		2					1		1					
Total Waste	16.14	4	1.04	9						1														1					
%waste	1.576	5	1.76	28		1					1	2						1			1					1			
Sum(Xj)	104	6	1.97	3										1														
Dice Method	2	7	2.01	1																						1				
Sum(Wj)	88	8	2.82	6			1													1						1			
nDiffPat	21	9	3.20	33			2		1			2						1			2								
		10	4.38	14															1				2						
		11	4.65	12																				1					
		12	4.85	14																	2										
		13	5.17	13		1																	1					
		14	5.38	15					1																	1			
		15	5.80	12							1					1				1									
		16	7.92	14				1		1				1			1												
		17	7.93	16									1											1	1				
		18	8.28	10											1														

Run no.	49				J	1	16	17	7	14	22	11	12	19	13	15	23	9	20	8	21	2	6	10	4	18	5	3	24
w Before	170	i	Li	Di	Xj	19	1	8	3	20	1	1	2	1	1	2	2	8	3	3	2	5	1	6	4	5	4	1	
w After	99	1	0.55	46	Pj: Aij		1				1							4		1					1	1			
Sum(Tj)	5.73	2	0.86	45					1			7		2		1	1		1			1	1		5		1	1	
Sum(Li·OSi)	6.6	3	0.88	69						2	3			1	1									3		1		1	
Total Waste	12.33	4	1.36	14									1			1	3										1		
%waste	1.212	5	1.71	19							1		2										4			2			
Sum(Xj)	103	6	1.94	7													2			1									
Dice Method	2	7	2.06	5										1						1								1	
Sum(Wj)	72	8	2.30	24																1	2	2	1	1				1	
nDiffPat	23	9	2.70	11															1		2						1		
		10	3.90	20								1				1		2										1	
		11	3.98	12				1	1						1													
		12	4.49	8															1			1						
		13	5.05	19							1		1		1		1			1				1			1		
		14	5.15	13					1					1											1	1			
		15	6.02	8				1																				
		16	8.19	20						1																		
		17	9.33	1			1																						
		18	9.83	19		1																							

Run no.	48				J	18	12	5	15	13	4	9	14	10	19	6	17	11	2	20	7	16	8	1	3	21	22	23	24
w Before	140	i	Li	Di	Xj	6	14	9	2	1	9	3	4	1	1	12	3	5	12	2	2	3	1	7	3				
w After	70	1	0.21	39	Pj: Aij		1						2	1	1	1			1										
Sum(Tj)	4.73	2	0.43	98			2	2		6			1	5	3		1	3		2	1			1	1				
Sum(Li·OSi)	5.07	3	0.58	23												1					1	2			1				
Total Waste	9.8	4	1.59	14								2			3									1					
%waste	0.990	5	1.80	12															1									
Sum(Xj)	100	6	1.83	14					1						2			2										
Dice Method	2	7	2.08	3													1												
Sum(Wj)	73	8	2.24	6									1								1								
nDiffPat	20	9	2.42	31						3				1		1	1			2		2	2						
		10	3.97	26							1											1		2					
		11	4.25	2																1									
		12	4.98	12		2																							
		13	5.05	10										1			1	1					1						
		14	6.01	9							1																		
		15	6.74	21								1	1			1					1								
		16	7.99	14					1										1										
		17	8.85	17			1																		1				
		18	9.14	9				1																					

Run no.	47				J	5	6	12	1	17	3	14	18	4	16	13	10	8	2	11	15	9	7	19	20	21	22	23	24
w Before	116	i	Li	Di	Xj	5	8	7	1	4	19	1	14	12	2	6	2	5	5	3	1	4	4						
w After	41	1	0.39	6	Pj: Aij											1													
Sum(Tj)	8.48	2	0.49	21								4		1				1		1									
Sum(Li·OSi)	9.46	3	0.67	133				2	2	1	3						5		6				4						
Total Waste	17.94	4	1.15	15										1						1									
%waste	1.773	5	1.36	18			1								2	1													
Sum(Xj)	103	6	1.43	7					1												2		1						
Dice Method	2	7	2.40	9														1				1							
Sum(Wj)	78	8	2.66	8			1																						
nDiffPat	18	9	3.28	23		3											2					1							
		10	4.07	14									1																
		11	4.26	18				2														1							
		12	4.64	8						2																				
		13	5.28	0																									
		14	5.83	31			1						1						1				1						
		15	7.09	9					1						1			1			1								
		16	7.99	19							1	1																	
		17	8.24	12										1															
		18	8.25	9												1				1									

Run no.	46				J	1	16	14	19	11	15	17	9	21	12	3	13	5	10	4	7	20	8	18	2	6	22	23	24
w Before	158	i	Li	Di	Xj	11	2	2	9	5	1	1	2	1	4	2	3	6	9	4	8	7	5	3	7	4			
w After	85	1	0.21	42	Pj: Aij		1	1	1				3	1			1			1	1				1				
Sum(Tj)	5.42	2	0.41	64					1	3		5			1		1	2								4			
Sum(Li·OSi)	0	3	0.56	54								4	4				2		1	1	2			2	3					
Total Waste	5.42	4	1.00	22						1					2		1	1											
%waste	0.568	5	1.38	7																		1						
Sum(Xj)	96	6	1.78	11					1				1																
Dice Method	2	7	2.63	20															1		1			1					
Sum(Wj)	77	8	2.68	8										1			1									1			
nDiffPat	21	9	2.96	12										1						1		1							
		10	3.58	16																	2								
		11	4.04	15				1						1									1		1					
		12	4.82	9			2																1						
		13	5.66	23				1									1			1		1		1		1			
		14	5.70	8								1													1				
		15	6.77	9															1									
		16	7.58	27						1	1	1		1		1			1												
		17	8.76	2												1													
		18	9.83	11		1																							

Run no.	45				J	6	5	14	8	17	18	7	12	11	2	3	21	9	20	13	23	15	19	4	1	16	22	10	24
w Before	197	i	Li	Di	Xj	1	14	1	10	8	5	3	1	1	9	3	2	1	2	3	6	2	5	2	3	4	2	7	
w After	83	1	0.31	52	Pj: Aij	1		1		3		4	1			2	3			1			1	1		1	1		
Sum(Tj)	5.3	2	0.52	23												1								1	1	2		1	
Sum(Li·OSi)	4.65	3	0.54	85				6	2			1		2	2	1	1				1		3		2	1			
Total Waste	9.95	4	1.00	5							1																		
%waste	1.058	5	1.68	32			1							3				1		1						1		1	
Sum(Xj)	95	6	1.79	3										1									1						
Dice Method	2	7	2.05	6																		1								
Sum(Wj)	78	8	2.24	13		1															1			1			2		
nDiffPat	23	9	2.80	21										1				3			1				1	3				
		10	3.68	9											1													
		11	3.68	20		2			1					1														1	
		12	4.12	11														2						1				1	
		13	5.00	5									1						2										
		14	5.17	30					1						1					1	1						1		
		15	6.42	5				1																		1			
		16	8.05	5																			1						
		17	8.21	22			1					1				1						1								
		18	8.97	13						1	1																		

Run no.	94				J	5	1	10	2	12	9	6	13	8	15	16	11	7	14	4	3	17	18	19	20	21	22	23	24
w Before	105	i	Li	Di	Xj	6	3	6	5	14	16	17	5	1	12	3	6	4	9	3	1								
w After	52	1	0.74	25	Pj: Aij	2	2						1	1							1								
Sum(Tj)	16.94	2	0.92	61								2				2			2	1									
Sum(Li·OSi)	0	3	0.97	74					1			1		2	1		2	1	2	1	1								
Total Waste	16.94	4	1.37	3																1									
%waste	1.550	5	1.71	15			1										2												
Sum(Xj)	111	6	2.00	22							1			2				1											
Dice Method	2	7	2.38	9									1					1											
Sum(Wj)	105	8	3.00	14						1																			
nDiffPat	16	9	3.28	17							1			1															
		10	3.50	10				1								1					1								
		11	4.04	0																									
		12	4.64	30							1					1	1	1			1								
		13	6.21	9															1										
		14	6.45	6				1																					
		15	6.73	25			1			1			1							1									
		16	7.17	17								1																	
		17	8.38	18		1									1														
		18	8.79	5					1																				

Run no.	93				J	2	4	10	8	15	17	7	9	11	16	5	14	18	19	21	20	13	12	3	6	1	22	23	24
w Before	129	i	Li	Di	Xj	4	29	4	8	8	3	1	1	3	1	3	1	1	1	10	3	5	10	2	1	3			
w After	91	1	0.64	64	Pj: Aij		1	2	1		3	1			2			2						1		1			
Sum(Tj)	5.73	2	0.75	13									2	1							1	1							
Sum(Li·OSi)	1.86	3	0.83	83			1		3	1		3	2		1	2	1		7		1								
Total Waste	7.59	4	1.03	15											1					1		1							
%waste	0.750	5	1.43	21						1						1	1					1			4				
Sum(Xj)	102	6	1.97	4		1																							
Dice Method	2	7	2.14	15																1					2	1			
Sum(Wj)	93	8	2.40	15										1				2					1						
nDiffPat	21	9	2.62	10						1														1					
		10	3.36	17																			1	2		1			
		11	3.86	6													2	1								1			
		12	4.18	17															1		2		1						
		13	5.09	8						1																			
		14	6.79	28					1				1		1	1				1		1							
		15	6.81	4								1		1															
		16	8.00	7		1					1																		
		17	8.45	29			1																						
		18	8.67	4				1																					

Run no.	92				J	12	15	2	4	7	6	16	8	10	18	14	17	11	13	3	1	9	5	19	20	21	22	23	24
w Before	106	i	Li	Di	Xj	23	3	14	1	4	1	4	1	13	5	1	5	6	2	6	10	3	2						
w After	62	1	0.39	73	Pj: Aij	1				2				2						1			5						
Sum(Tj)	11.42	2	0.41	1							1		1																
Sum(Li·OSi)	4.11	3	0.77	86				5			1	1			1	1		1											
Total Waste	15.53	4	1.30	16													1			2									
%waste	1.516	5	1.49	7												1		1											
Sum(Xj)	104	6	1.63	17							3						1				1								
Dice Method	2	7	2.07	11											1				1				2						
Sum(Wj)	80	8	2.37	5															1			1							
nDiffPat	18	9	2.82	24			1		1			2	2								1								
		10	3.58	16					2			1			2														
		11	3.76	4												1						1							
		12	3.87	20							1		1			1		2				1	1						
		13	5.55	12															1		1								
		14	6.14	14				1																					
		15	6.99	14			1										1			1									
		16	9.03	4						1																			
		17	9.11	13										1															
		18	9.28	23		1																							

Run no.	91				J	6	2	11	15	17	19	8	20	7	9	16	4	1	14	12	18	3	13	10	5	21	22	23	24
w Before	137	i	Li	Di	Xj	2	11	14	1	15	14	2	4	3	1	7	9	6	2	1	1	4	1	11	3				
w After	58	1	0.40	4	Pj: Aij						1	1			1				1		1								
Sum(Tj)	9.72	2	0.78	31		2		1	1					1							9								
Sum(Li·OSi)	6.4	3	0.99	125				1				1					10	2	1				2		1				
Total Waste	16.12	4	1.57	0																									
%waste	1.460	5	1.69	23						1					2			1											
Sum(Xj)	112	6	1.88	17				1											1				1						
Dice Method	2	7	2.35	24		1			1			1	1								1			1	1				
Sum(Wj)	101	8	2.84	3																					1				
nDiffPat	20	9	3.08	13																2				1					
		10	3.77	16									2							1		1			1				
		11	3.88	7												1													
		12	4.57	17										2										1					
		13	6.08	17		1						1			1	1						1	1						
		14	6.30	20				1										1											
		15	6.68	3					1										1										
		16	8.29	15						1																			
		17	9.37	14							1																		
		18	9.86	11			1																						

Run no.	90				J	2	8	4	12	13	9	5	6	14	1	7	16	17	10	15	11	3	18	19	20	21	22	23	24
w Before	119	i	Li	Di	Xj	12	1	3	1	7	10	3	14	3	1	4	10	2	1	14	7	2							
w After	57	1	0.39	27	Pj: Aij				1	2							1	1											
Sum(Tj)	5.23	2	0.45	36							1		1		1		1	1											
Sum(Li·OSi)	7.39	3	0.64	97		1		2	2			2	2			5	2		1			1							
Total Waste	12.62	4	1.17	19						2				2					1										
%waste	1.346	5	1.18	16																	1	5							
Sum(Xj)	95	6	1.31	5										1				1											
Dice Method	2	7	2.13	1			1																						
Sum(Wj)	67	8	2.31	17								1								1									
nDiffPat	17	9	2.57	22											1					1	1								
		10	3.40	11				1								2													
		11	3.42	17						2					2							1							
		12	4.05	12							1								2										
		13	5.12	17				1												1									
		14	5.50	10							1																		
		15	6.24	13								1		1							1								
		16	7.83	13			1										1	1											
		17	8.20	15					1				1																
		18	9.24	12		1																							

Run no.	89				J	4	13	16	7	17	1	9	19	5	2	6	11	8	15	10	12	14	18	20	3	21	22	23	24
w Before	143	i	Li	Di	Xj	7	2	6	7	17	4	7	8	1	7	1	1	4	1	11	1	2	5	6	5				
w After	70	1	0.56	80	Pj: Aij		1			1	3	1	1	10	1			3	2					1	1				
Sum(Tj)	10.07	2	0.64	7					1							1													
Sum(Li·OSi)	8.53	3	0.99	73		1		2	2		1						3	1			5	1	1	2	1				
Total Waste	18.6	4	1.21	17				1							1										1				
%waste	1.839	5	1.46	10																			2						
Sum(Xj)	103	6	1.63	13													1		1	1									
Dice Method	2	7	2.20	2			1										1												
Sum(Wj)	103	8	3.04	19											1	1	1						2						
nDiffPat	20	9	3.10	19												2				1				1					
		10	4.21	8									1																
		11	4.34	16								1		1								1		1					
		12	4.48	16		2																1							
		13	5.02	8								1									1								
		14	5.14	26									1		1					1									
		15	6.65	6				1																					
		16	7.23	12			1				1								1						1				
		17	7.25	11					1									1											
		18	9.26	17						1																			

Run no.	44				J	2	3	8	9	17	7	18	14	10	5	15	12	1	16	19	11	4	21	20	13	6	22	23	24
w Before	164	i	Li	Di	Xj	4	12	13	8	1	8	2	6	1	11	7	1	1	7	4	1	2	1	2	9	1			
w After	85	1	0.26	35	Pj: Aij	1	1			1				4						2	3	1		1					
Sum(Tj)	2.47	2	0.45	76		1			1		1	2	1		2			1	1			3			1	1			
Sum(Li·OSi)	6.03	3	0.99	49						2				2	1	1	1	1	1		4	1		1	1	1			
Total Waste	8.5	4	1.07	12									2																
%waste	0.840	5	1.68	14								1			1								1	1					
Sum(Xj)	102	6	1.75	14													1		1	1			2						
Dice Method	2	7	2.41	5													3				1		2						
Sum(Wj)	85	8	2.60	13				1																					
nDiffPat	21	9	2.85	22		1												3			1			1	1	3			
		10	3.85	8							1																		
		11	4.21	9												1								1					
		12	4.77	23					2							1													
		13	5.69	17							1														1				
		14	6.43	15		1									1														
		15	6.80	8										1					1										
		16	7.39	23				1				1	1									1							
		17	7.73	5						1										1									
		18	9.64	12			1																						

Run no.	43				J	4	8	6	2	22	20	17	3	12	5	19	14	18	21	13	16	10	15	9	11	7	1	23	24
w Before	178	i	Li	Di	Xj	1	7	1	6	8	7	1	16	1	1	2	1	1	1	17	4	12	1	1	6	3	1		
w After	89	1	0.43	8	Pj: Aij									1	1			1	2					3					
Sum(Tj)	5.54	2	0.62	89				1		1					1				5	2	1	1	3		2	3			
Sum(Li·OSi)	8.09	3	0.96	63				6			1		2					1				1	2			1			
Total Waste	13.63	4	1.14	5													1						1			1			
%waste	1.396	5	1.19	17																		1			1				
Sum(Xj)	99	6	1.43	18											1					1									
Dice Method	2	7	2.47	7		4								1		1													
Sum(Wj)	66	8	2.48	24							1	4				3		1							1				
nDiffPat	22	9	3.30	9						1																	2		
		10	3.34	5										1							1								
		11	3.40	8			1																				1		
		12	3.60	27				1						1			1					2		1					
		13	5.07	9													1						1	1	1				
		14	6.04	17						1								1	1		1					1			
		15	6.56	14			1				1																		
		16	7.33	18											1					1									
		17	8.00	16									1																
		18	9.65	6					1																				

Run no.	42				J	1	16	2	9	11	12	6	18	10	17	5	15	7	8	3	19	4	14	13	20	21	22	23	24
w Before	130	i	Li	Di	Xj	5	4	3	5	4	1	3	11	8	5	2	1	2	16	1	2	5	10	6					
w After	59	1	0.23	109	Pj: Aij			6	1	1	2	1		1	5	1	1		2		2	1							
Sum(Tj)	4.17	2	0.49	6																	3								
Sum(Li·OSi)	0	3	0.54	45											2							1	3						
Total Waste	4.17	4	1.02	5								1								2									
%waste	0.446	5	1.39	25					1	1			1									1							
Sum(Xj)	94	6	1.67	10										1		1													
Dice Method	2	7	2.05	7			1									1	1												
Sum(Wj)	53	8	2.38	18						1	4												1						
nDiffPat	19	9	3.33	15		3																							
		10	4.07	21					1										1										
		11	4.31	17				2	1															1					
		12	4.53	2														1											
		13	5.47	18														1	1										
		14	5.55	6																				1					
		15	6.00	16						1						1							1						
		16	7.72	11											1		1					1							
		17	7.93	15			1							1						1	1								
		18	8.60	14								1	1																

Run no.	41				J	2	13	1	4	10	9	12	15	11	16	5	14	8	7	6	3	17	18	19	20	21	22	23	24
w Before	77	i	Li	Di	Xj	1	20	5	10	7	1	19	10	7	5	1	5	2	3	2	6								
w After	39	1	0.30	51	Pj: Aij	1						1	1		2			1	3										
Sum(Tj)	6.78	2	0.51	19			1																						
Sum(Li·OSi)	2.23	3	0.73	90					1	7			1			1	1		1		2								
Total Waste	9.01	4	1.59	0																									
%waste	0.874	5	1.72	11							2		1																
Sum(Xj)	104	6	1.84	29												5	2			1	2								
Dice Method	2	7	2.62	5				1																					
Sum(Wj)	84	8	3.00	14										2															
nDiffPat	16	9	3.21	21							2	1																	
		10	3.74	11		1			1																				
		11	3.98	16										1	1					2									
		12	4.84	13						1											1								
		13	5.41	20					1						1		1												
		14	5.96	1		1																							
		15	6.49	19								1																	
		16	7.19	15				1					1																
		17	8.33	3															1										
		18	9.43	22			1											1											

Run no.	40				J	3	15	7	11	8	19	2	18	10	6	9	21	12	13	16	14	22	23	4	1	17	5	24	20
w Before	170	i	Li	Di	Xj	5	2	7	2	1	5	3	6	11	5	3	9	1	13	11	1	1	4	2	6	3	1	6	1
w After	86	1	0.86	59	Pj: Aij				2	1									1	1	5		1	1		1	5	2	
Sum(Tj)	21.27	2	0.88	77			1					1	2		1	1							6			9	1		
Sum(Li·OSi)	5.15	3	0.97	24			4					1				1				1									
Total Waste	26.42	4	1.19	3																						1			
%waste	2.486	5	1.48	8					1																1				
Sum(Xj)	109	6	1.84	29													1	4	1		3								
Dice Method	2	7	2.41	9																							2	1	1
Sum(Wj)	101	8	2.55	8														1				1						1	
nDiffPat	24	9	3.32	23		3																2						1	1
		10	3.74	13										1										1					
		11	3.81	14							1				1								1						
		12	4.19	13																					2				1
		13	5.12	9			1								1									1					
		14	6.06	16							1			1															
		15	6.77	15					1										1										
		16	8.10	32								1	1			1	1			1									
		17	8.31	1						1																			
		18	9.32	7				1																					

Run no.	39				J	15	17	13	8	11	4	6	20	12	19	21	14	22	18	16	10	23	5	2	7	9	1	3	24
w Before	200	i	Li	Di	Xj	15	5	17	8	4	4	5	9	1	1	1	1	1	1	1	6	14	2	2	1	1	3	1	
w After	113	1	0.35	69	Pj: Aij					1			1					1	3	6	7						2		
Sum(Tj)	3.15	2	0.45	80			1			1	2		2	4				6			1	2						1	
Sum(Li·OSi)	2.49	3	0.98	11					1											1					2				
Total Waste	5.64	4	1.73	6													1		1						1		1		
%waste	0.545	5	1.78	16								1			1									3	1		1		
Sum(Xj)	104	6	1.79	18									1			3	2						1			1		2	
Dice Method	2	7	2.28	21												2	2					1		1		1			
Sum(Wj)	69	8	2.38	7											2								1	1		1			
nDiffPat	23	9	2.42	12			1					1		1														1	
		10	3.40	5						1					1														
		11	3.55	26			2												2		2					1		1	
		12	4.53	9							2														1				
		13	5.78	15						1		1		1									1				1		
		14	6.82	15																1		1							
		15	6.95	10									1					1											
		16	9.02	8					1																				
		17	9.92	17				1																					
		18	9.96	15		1																							

c	88				J	14	2	15	3	9	4	8	16	20	21	6	17	10	18	19	22	7	5	12	13	11	1	23	24
w Before	167	i	Li	Di	Xj	1	19	5	1	14	2	2	2	7	2	2	1	1	1	4	2	14	6	4	1	10	5		
w After	79	1	0.62	36	Pj: Aij				1				1			1									3	3			
Sum(Tj)	11.45	2	0.64	70		2				3	1				2	1	1					1		1					
Sum(Li·OSi)	6.58	3	0.94	54				1	1		2	2	1	1							1					2	2		
Total Waste	18.03	4	1.19	20							1						1	1					1	1	1		1		
%waste	1.730	5	1.53	6					1										2	1									
Sum(Xj)	106	6	1.72	14									1		1					1			1						
Dice Method	2	7	2.23	16				1					3								3								
Sum(Wj)	105	8	2.34	0																									
nDiffPat	22	9	2.35	24																	1	1		2					
		10	3.45	20																			1	1			2		
		11	3.62	6																			1						
		12	4.50	14										2															
		13	6.25	12							1															1			
		14	6.73	11				1	1										1	1									
		15	6.95	17											1							1			1				
		16	7.99	17						1		1					1												
		17	8.67	4		1										1		1											
		18	9.66	19			1																						

Run no.	87				J	7	10	1	5	11	12	9	20	16	8	13	2	17	14	3	18	4	6	19	15	21	22	23	24
w Before	151	i	Li	Di	Xj	2	10	6	1	7	8	9	5	8	19	4	1	1	3	4	2	7	1	3	1				
w After	78	1	0.21	47	Pj: Aij		1		2				1	1			2		2		8								
Sum(Tj)	3.37	2	0.61	60		5				1					2	1									1				
Sum(Li·OSi)	6.47	3	0.71	53					1			1		4			2	1				1			1				
Total Waste	9.84	4	1.20	13					2							1	1							2					
%waste	0.974	5	1.21	20							1							3	1			1	1						
Sum(Xj)	102	6	1.21	7					1	1								2											
Dice Method	2	7	2.33	9								1																	
Sum(Wj)	60	8	2.36	11																2				1					
nDiffPat	20	9	3.17	20									2					1			1	1							
		10	3.45	10									1						1				1		1				
		11	3.55	8							1																		
		12	4.91	22				2											1			1							
		13	5.15	3																	1				1				
		14	5.24	17					1		1									1			1	1					
		15	6.95	20		1						1		1			1												
		16	8.18	11						1						1													
		17	8.77	19											1														
		18	9.64	10			1																						

Run no.	86				J	10	1	17	3	15	14	4	6	16	13	11	7	12	5	2	8	9	18	19	20	21	22	23	24
w Before	114	i	Li	Di	Xj	6	7	1	6	11	3	5	6	4	7	11	3	6	3	7	11	2							
w After	52	1	0.41	55	Pj: Aij	3					1							2			2								
Sum(Tj)	5.99	2	0.58	43				1	1							1			6	1									
Sum(Li·OSi)	4.09	3	0.99	62			5			1			1	1				1											
Total Waste	10.08	4	1.03	25						1	1					1													
%waste	1.029	5	1.20	7											1														
Sum(Xj)	99	6	1.62	8								1					1												
Dice Method	2	7	2.82	7																1									
Sum(Wj)	96	8	3.11	7				3														2							
nDiffPat	17	9	3.26	26							1						1		2	2									
		10	3.75	2																		1							
		11	3.96	10									1	1															
		12	4.09	28					1									2			1								
		13	5.02	4										1															
		14	5.03	27			1						1				1				1								
		15	5.25	9					1		1																		
		16	7.92	11						1																			
		17	8.35	16								1				1													
		18	8.63	13		1									1														

Run no.	85				J	4	6	2	12	21	20	7	23	8	22	15	16	19	17	9	18	13	5	14	10	3	1	11	24
w Before	172	i	Li	Di	Xj	1	15	18	2	4	1	6	1	1	3	12	1	1	1	5	2	1	6	8	2	3	2	1	
w After	85	1	0.36	23	Pj: Aij	3	1			1	1		1	1			2		3						1	1			
Sum(Tj)	3.17	2	0.57	104			3		1		1	1		1	4	2						3						10	
Sum(Li·OSi)	6.82	3	0.98	33						2			3					1			5		1				2	1	
Total Waste	9.99	4	1.25	17								1						1	1					1		1			
%waste	1.041	5	1.49	5										3											1				
Sum(Xj)	97	6	1.64	18									1							3							1		
Dice Method	2	7	2.32	18				1																					
Sum(Wj)	87	8	2.86	16			1				1																		
nDiffPat	23	9	3.32	6					1																	1		1	
		10	3.69	9																		1		1					
		11	4.07	17								2					1								2				
		12	4.49	14										1								1	2						
		13	5.06	35			1						1				1			1	1			1		1			
		14	6.09	3					1		1																		
		15	6.38	2																							1		
		16	7.63	27				1		1					1			1	1										
		17	8.09	0																									
		18	8.85	13		1										1													

Run no.	84				J	7	5	9	4	20	2	11	6	3	19	13	8	16	10	12	15	14	1	18	17	21	22	23	24
w Before	153	i	Li	Di	Xj	1	8	6	2	8	19	3	1	19	3	5	10	1	1	2	5	1	2	9	3				
w After	61	1	0.36	87	Pj: Aij	2	1							1	2	6			2	2	1	1			5				
Sum(Tj)	6.99	2	0.70	38				1					2				1	2						2					
Sum(Li·OSi)	5.9	3	0.82	35							1				1				3		1				2				
Total Waste	12.89	4	1.57	13											1						2								
%waste	1.197	5	1.59	8																		4	2						
Sum(Xj)	109	6	1.80	19			1		1															1					
Dice Method	2	7	2.47	13		1											1			1									
Sum(Wj)	78	8	2.85	10				1					1					3											
nDiffPat	20	9	3.28	17					1			3										1			2				
		10	4.31	0																									
		11	4.69	19										1															
		12	4.90	21					1					1															
		13	5.68	6									1								1								
		14	6.38	6				1																					
		15	6.80	28		1									1		1		1	1			1	1					
		16	7.84	13			1									1													
		17	9.02	19							1																		
		18	9.84	8						1																			

Run no.	83				J	2	5	16	22	20	19	11	14	21	8	15	13	17	18	12	10	9	7	4	3	6	1	23	24
w Before	134	i	Li	Di	Xj	7	14	6	1	19	1	9	8	2	10	2	1	1	2	2	2	1	6	4	4	6	3		
w After	86	1	0.76	4	Pj: Aij													1		1		1							
Sum(Tj)	16.31	2	0.93	80								1	2	1	3	4		6					2						
Sum(Li·OSi)	6.59	3	0.93	76			1	3	1				1	2						4		6			3	1			
Total Waste	22.9	4	1.18	8							1					1			1						1				
%waste	2.107	5	1.27	16												1					1	1		2			1		
Sum(Xj)	111	6	1.69	16							1		1						1							1			
Dice Method	2	7	2.17	7													1						1						
Sum(Wj)	95	8	2.36	27					1			1							3			1	1		1				
nDiffPat	22	9	2.55	6																							2		
		10	3.61	20														1					1		1	1	1		
		11	3.70	18												1					1			2		1			
		12	5.00	2																	1								
		13	5.52	10									1							1									
		14	6.67	10					1			1																	
		15	7.09	20				1			1			1	1		1												
		16	8.88	14			1																						
		17	9.56	19						1																			
		18	9.93	7		1																							

Run no.	38				J	3	4	7	15	6	9	5	14	10	11	25	16	22	20	19	23	21	1	13	8	18	17	2	24
w Before	218	i	Li	Di	Xj	1	9	19	6	1	6	10	3	2	3	3	5	3	5	1	1	1	1	1	2	11	1	1	2
w After	123	1	0.32	69	Pj: Aij	1		1	2					1				4	3		1	2	5	1	1			1	
Sum(Tj)	6.52	2	0.61	45						1							4					1	1	3			1	1	1
Sum(Li·OSi)	7.64	3	0.67	46						1		1		1		1			1	3	1		1		1	1			
Total Waste	14.16	4	1.20	6		1																			1		2	1	
%waste	1.394	5	1.26	12							2																		
Sum(Xj)	103	6	1.45	22					1	6	1			2															
Dice Method	2	7	2.39	8												1			1										
Sum(Wj)	98	8	2.88	23			1														1					1			1
nDiffPat	25	9	3.18	9													1												2
		10	3.54	23			2						1										2						
		11	3.97	4		1									1														
		12	4.35	13		1											1	2				2							
		13	5.97	17							1			1	1				1		1								
		14	6.35	14									1													1			
		15	6.83	9												1											1		
		16	7.80	11					1											1				1	1			1	
		17	9.30	10								1																	
		18	9.62	19				1																					

Run no.	37				J	4	16	7	3	6	15	18	11	8	13	19	20	10	1	17	9	5	12	2	14	21	22	23	24
w Before	148	i	Li	Di	Xj	3	1	9	22	6	12	7	1	6	3	11	1	6	3	1	2	3	2	3	2				
w After	72	1	0.42	74	Pj: Aij	4		1					3	1	1	1	14		1				1	6	1				
Sum(Tj)	9.59	2	0.46	16										1			1					2			3				
Sum(Li·OSi)	8.97	3	0.91	70			1			1	1				3	3			1	1			1	1					
Total Waste	18.56	4	1.07	2																					1				
%waste	1.817	5	1.27	15			1									1		1											
Sum(Xj)	104	6	1.83	23		1				1				1	1		2					1							
Dice Method	2	7	2.10	30							2									2			1		1				
Sum(Wj)	92	8	2.26	7									1					1											
nDiffPat	20	9	2.56	3			3																						
		10	4.74	19				2												1									
		11	4.87	19							1	1																	
		12	4.96	2																	1								
		13	5.01	14								1			1						1				1				
		14	5.58	11												1													
		15	6.43	15		1							1					1					1	1					
		16	7.15	15						1				1								1							
		17	8.51	3															1										
		18	9.83	22					1																				

Run no.	36				J	3	7	4	12	10	13	1	5	17	18	14	6	2	11	16	15	8	9	19	20	21	22	23	24
w Before	139	i	Li	Di	Xj	7	3	18	7	4	3	2	1	1	6	16	3	6	1	7	4	5	5						
w After	64	1	0.24	68	Pj: Aij	1			5	1		3	1		1		1	1	2										
Sum(Tj)	2.6	2	0.86	61									4			2			1	2		1	1						
Sum(Li·OSi)	2.2	3	0.96	31								1			1	1	1				1								
Total Waste	4.8	4	1.72	20				1				1		1															
%waste	0.487	5	1.97	7																1									
Sum(Xj)	99	6	1.98	13															3			1	1						
Dice Method	2	7	2.22	20					1								1					2							
Sum(Wj)	79	8	2.37	0																									
nDiffPat	18	9	2.72	20						1	1			3					1		1	1							
		10	3.50	14						2								1											
		11	3.52	12		1																	1						
		12	3.61	14			1				2												1						
		13	6.24	13		1												1											
		14	6.31	15			1						1							1	1								
		15	6.57	12					1			1					1												
		16	7.31	16												1													
		17	8.22	18				1																					
		18	8.77	6											1														

Run no.	35				J	6	5	1	14	3	13	7	4	16	8	10	15	17	2	9	11	12	18	19	20	21	22	23	24
w Before	128	i	Li	Di	Xj	8	3	6	5	24	6	1	1	7	1	21	1	4	4	6	4	1	1	2					
w After	61	1	0.36	54	Pj: Aij	1			1	1	2	1							1	1									
Sum(Tj)	4.5	2	0.44	57			1		1			3	1			1	6	1			3		2						
Sum(Li·OSi)	2.16	3	1.00	49									1	1		1		1	1		1		2	3					
Total Waste	6.66	4	1.21	7									7																
%waste	0.632	5	1.33	15				1							3					1									
Sum(Xj)	106	6	1.75	18			2										1					3		4					
Dice Method	2	7	2.37	8																1		2							
Sum(Wj)	76	8	2.98	28										1		1													
nDiffPat	19	9	3.11	4																	1								
		10	3.74	5								1						1											
		11	4.57	15					2			1									1								
		12	4.82	20		2												1											
		13	5.56	22												1	1												
		14	5.94	17			1							1	1					1									
		15	7.05	1																			1						
		16	8.57	10				1											1										
		17	9.28	6							1																		
		18	9.57	24						1																			

Run no.	34				J	8	16	19	14	10	5	15	17	9	6	11	4	12	18	13	20	1	7	21	2	3	22	23	24
w Before	148	i	Li	Di	Xj	1	13	27	4	2	1	8	9	1	3	1	3	2	1	1	3	9	1	1	7	11			
w After	63	1	0.32	0	Pj: Aij																								
Sum(Tj)	5.19	2	0.68	117					1	1	3	1		8		1		1	4	8	2	3	8	8	1	2			
Sum(Li·OSi)	5.52	3	0.84	43			1					1														2			
Total Waste	10.71	4	1.14	16													1	2					4		1				
%waste	0.992	5	1.14	16							1			4		2						1							
Sum(Xj)	109	6	1.49	8		1																			1				
Dice Method	2	7	2.28	5																	1			2					
Sum(Wj)	77	8	2.30	24					1						1		2		2			1							
nDiffPat	21	9	2.56	11						1					3				1										
		10	3.69	9									1																
		11	4.22	21		2						2					1												
		12	4.52	10																1		1							
		13	6.31	12									1								1								
		14	6.68	10						1	1														1				
		15	6.96	18					1							1		1								1			
		16	7.75	0																									
		17	9.06	13			1																						
		18	9.92	27				1																					

Run no.	33				J	7	5	13	10	14	4	17	16	1	18	9	11	12	6	2	15	8	3	19	20	21	22	23	24
w Before	97	i	Li	Di	Xj	2	6	8	14	3	1	9	14	1	5	6	11	6	6	1	1	2	3						
w After	52	1	0.43	43	Pj: Aij		1	2			1		1			1													
Sum(Tj)	5.83	2	0.56	14									1																
Sum(Li·OSi)	8.83	3	0.67	103			3			1	1				1		2	2	1	11		4	8						
Total Waste	14.66	4	1.37	13							1			1			1												
%waste	1.503	5	1.53	13										1							4		3						
Sum(Xj)	99	6	1.72	14					1																				
Dice Method	2	7	2.26	3						1																			
Sum(Wj)	91	8	2.61	20					1							1				1									
nDiffPat	18	9	2.94	17		1						1						1											
		10	3.50	24						2		2																	
		11	3.57	13											1				1			1							
		12	3.75	3																	1	1							
		13	5.61	25					1						1			1											
		14	5.75	6															1										
		15	6.96	9		1								1		1													
		16	7.26	11													1												
		17	7.51	7			1				1																		
		18	8.99	22				1					1																

Run no.	82				J	15	6	8	19	3	2	18	10	16	14	5	13	1	20	11	17	12	7	9	4	21	22	23	24
w Before	209	i	Li	Di	Xj	3	6	6	1	1	8	1	20	4	5	5	9	7	2	1	1	10	1	1	5				
w After	101	1	0.43	28	Pj: Aij	1	1	1	4			1		1				1											
Sum(Tj)	3.68	2	0.72	101					1				3		1		2				1	1	1	1	1				
Sum(Li·OSi)	2.01	3	0.85	31		1				1							1	1			1	1							
Total Waste	5.69	4	1.07	12						2						1									1				
%waste	0.590	5	1.51	16						1					1	1									1				
Sum(Xj)	97	6	1.77	12						1		1										1							
Dice Method	2	7	2.03	11		1								1					2										
Sum(Wj)	89	8	2.05	14			1											1						1					
nDiffPat	20	9	2.33	15				1							1				1		2								
		10	3.61	25				2		1	1								1					2					
		11	3.67	1																1									
		12	3.76	14			2														1		1						
		13	5.41	6											1								1						
		14	6.29	9							1									1									
		15	6.65	25		1												1				1			1				
		16	7.39	10					1					1		1													
		17	7.70	10								1					1												
		18	7.81	20									1																

Run no.	81				J	2	6	4	10	18	3	1	9	7	13	15	11	8	12	14	17	19	16	5	20	21	22	23	24
w Before	120	i	Li	Di	Xj	6	8	1	15	7	3	4	17	1	22	1	1	8	3	4	1	2	1	1					
w After	70	1	0.35	46	Pj: Aij		1		1	1	3			2					1		1			1					
Sum(Tj)	8.44	2	0.61	26								2					2	1	2			1							
Sum(Li·OSi)	7.38	3	0.65	88					1				1	2	1		6	2	1	2		1	3						
Total Waste	15.82	4	1.14	13								1						1					1						
%waste	1.515	5	1.18	13		2								1		1													
Sum(Xj)	106	6	1.88	14						1						1				1	1			1					
Dice Method	2	7	2.30	21				1	1		1												3						
Sum(Wj)	96	8	2.91	11															1		1	3		1					
nDiffPat	19	9	3.00	8			1																						
		10	4.42	17									1																
		11	4.84	1																	1								
		12	4.85	22									1				1		1					1					
		13	6.64	26			1		1		1																		
		14	6.81	5										1						1									
		15	6.93	9												1		1											
		16	7.64	11		1		1				1																	
		17	7.75	7						1																			
		18	9.10	22											1														

Run no.	80				J	15	17	19	3	11	10	13	4	14	1	12	16	21	8	18	7	9	20	2	5	6	22	23	24
w Before	158	i	Li	Di	Xj	15	1	8	8	10	4	13	1	20	3	1	2	6	1	1	1	1	2	2	1	4			
w After	79	1	0.60	36	Pj: Aij	1	1	1							1	3		2											
Sum(Tj)	17.87	2	0.97	46				1				1	1	1			1							1					
Sum(Li·OSi)	3.6	3	0.98	78					1	2		2	2			1	1			3			1		10	1			
Total Waste	21.47	4	1.05	12				1														2		1					
%waste	2.087	5	1.24	23			1							1									1						
Sum(Xj)	105	6	1.25	5																	1					1			
Dice Method	2	7	2.56	1																	1								
Sum(Wj)	96	8	3.24	27		1			1								1		2										
nDiffPat	21	9	3.31	12							3																		
		10	3.48	9									2						1				1			1			
		11	3.53	8											1					2		1		1					
		12	4.26	23													1	2				1	1	1		1			
		13	5.78	11					1						1														
		14	6.13	16		1															1								
		15	6.73	13								1																	
		16	7.21	9				1								1													
		17	7.48	20										1															
		18	7.96	11			1			1																			

Run no.	79				J	4	9	1	10	3	17	13	19	18	5	6	16	2	15	7	11	12	8	14	20	21	22	23	24
w Before	113	i	Li	Di	Xj	2	2	2	29	5	3	10	2	2	12	1	4	3	5	4	1	1	7	8					
w After	51	1	0.23	80	Pj: Aij			1	4	3	2	1	1		1			2	2		2	2	2	1					
Sum(Tj)	8.22	2	0.33	11										3	1														
Sum(Li·OSi)	35.45	3	0.38	69		4		3					1		2	3		1		1	2	1		2					
Total Waste	43.67	4	1.22	4													1												
%waste	4.429	5	1.74	14						1												2	1						
Sum(Xj)	103	6	1.82	22						1		1											1						
Dice Method	2	7	2.93	2				1																					
Sum(Wj)	96	8	3.00	15											1			1											
nDiffPat	19	9	3.03	23			1				2							2			1			1					
		10	3.46	17			2				1	1																	
		11	3.74	4																1									
		12	4.39	19								1				2	2												
		13	5.65	15				1							1							1							
		14	5.70	10						1										1	1								
		15	5.89	15																			1	1					
		16	8.38	2		1																							
		17	8.98	31					1					1															
		18	9.36	7									1						1										

Run no.	78				J	2	7	5	11	16	3	14	8	13	15	17	1	6	18	9	12	10	4	19	20	21	22	23	24
w Before	134	i	Li	Di	Xj	1	13	3	14	14	1	1	6	4	11	6	1	10	4	7	7	1	2						
w After	56	1	0.23	21	Pj: Aij	1		2								1			1		1								
Sum(Tj)	3.93	2	0.62	49		9			2		1						1		2			2							
Sum(Li·OSi)	3.81	3	0.88	90				2			1			1	2	3	4		1		3		5						
Total Waste	7.74	4	1.32	3							1												1						
%waste	0.736	5	1.43	13			1																						
Sum(Xj)	106	6	1.56	24		1											1	1		2									
Dice Method	2	7	2.31	16									1					1											
Sum(Wj)	85	8	2.56	9		1														1		1							
nDiffPat	18	9	2.81	15						1		1																	
		10	3.93	11											1														
		11	4.27	25										1	1		1			1			1						
		12	4.75	4										1															
		13	6.13	11														1				1							
		14	7.09	7								1				1													
		15	7.13	22						1	1										1								
		16	7.65	13				1					1						1										
		17	8.56	13			1																						
		18	8.72	14					1																				

Run no.	77				J	12	8	4	11	6	13	17	18	16	2	20	14	3	5	19	1	7	10	15	9	21	22	23	24
w Before	135	i	Li	Di	Xj	4	1	20	6	1	2	2	8	5	2	11	3	1	5	1	6	4	7	5	9				
w After	78	1	0.41	61	Pj: Aij	1				1		1	4	1		1					1								
Sum(Tj)	5.38	2	0.42	56				1							1				5				2						
Sum(Li·OSi)	3.71	3	0.73	43			2														3			1	2				
Total Waste	9.09	4	1.55	3													1												
%waste	0.890	5	1.55	20		1			1									1		1		2							
Sum(Xj)	103	6	1.61	17						1	1										1				1				
Dice Method	2	7	2.64	12												1		1											
Sum(Wj)	97	8	3.14	16										3						1									
nDiffPat	20	9	3.17	12								3			3														
		10	3.37	11																		1	1						
		11	3.51	4																		1							
		12	3.95	25		2				2									2					1					
		13	5.31	6																1				1					
		14	5.78	14														1			1		1						
		15	6.92	20												1									1				
		16	8.35	19					1		1		1				1												
		17	8.52	1			1																						
		18	9.49	20				1																					

Run no.	32				J	12	16	8	13	14	2	5	20	15	7	6	18	9	17	19	3	10	4	11	1	21	22	23	24
w Before	175	i	Li	Di	Xj	5	11	2	2	1	12	2	1	1	8	5	1	2	6	4	7	6	4	10	3				
w After	97	1	0.38	52	Pj: Aij				1		1	1							1	2		1	4						
Sum(Tj)	7.47	2	0.40	96			5	4		1	1								1	1				1					
Sum(Li·OSi)	1.89	3	0.63	12				1							1	1													
Total Waste	9.36	4	1.21	9													1	1	1										
%waste	1.017	5	1.52	24								1			1					1				1					
Sum(Xj)	93	6	1.89	7						1												1							
Dice Method	2	7	2.30	7																1					1				
Sum(Wj)	87	8	2.39	15										1									1	1					
nDiffPat	20	9	2.55	18						1							1				1				3				
		10	3.72	19									1	2				1			2								
		11	4.04	16							1	2																	
		12	4.28	5		1																							
		13	5.01	19						1	1							1		1									
		14	5.66	15		1																		1					
		15	6.08	6									1				1						1						
		16	7.73	16				1							1							1							
		17	7.91	17			1												1										
		18	9.29	7					1							1													

Run no.	31				J	11	2	4	7	6	14	13	8	1	12	10	3	9	5	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
w Before	77	i	Li	Di	Xj	9	20	7	10	1	4	9	4	7	11	2	9	1	4										
w After	37	1	0.34	39	Pj: Aij	1		1							1		2	1											
Sum(Tj)	4.74	2	0.44	70			1	1	1			1	1	1			1	3	1										
Sum(Li·OSi)	7.33	3	0.77	51			2		1		1																		
Total Waste	12.07	4	1.01	22								2				2													
%waste	1.247	5	1.32	17										1	1														
Sum(Xj)	98	6	1.64	1						1																			
Dice Method	2	7	2.03	22				1					1		1														
Sum(Wj)	83	8	2.58	9													1												
nDiffPat	14	9	3.30	9		1																							
		10	3.53	0																									
		11	3.73	31								2	2					1	1										
		12	4.57	9							2							1											
		13	5.83	4															1										
		14	6.30	29		1									1		1												
		15	7.12	7				1																					
		16	7.98	22			1									1													
		17	8.18	8						1				1															
		18	8.71	10					1																				

Run no.	30				J	14	2	1	5	7	6	9	3	4	12	8	13	10	11	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
w Before	48	i	Li	Di	Xj	24	16	2	1	12	11	6	1	1	7	15	1	8	1	2									
w After	31	1	0.30	25	Pj: Aij		2						1																
Sum(Tj)	6.2	2	0.89	24				2					2	2				2											
Sum(Li·OSi)	9.4	3	0.90	111				2	2	4		2			1	2				4									
Total Waste	15.6	4	1.40	2															7										
%waste	1.466	5	1.45	16														2											
Sum(Xj)	108	6	1.65	22											1	1													
Dice Method	2	7	2.11	6				3																					
Sum(Wj)	80	8	2.11	30					1						1	1	1			3									
nDiffPat	15	9	2.63	4									1				3												
		10	4.04	19							1	1		2															
		11	4.13	6								1																	
		12	4.44	15												1													
		13	5.28	16									1		1			1											
		14	5.92	12					1		1																		
		15	6.40	12						1																			
		16	9.18	16			1																						
		17	9.61	0																									
		18	9.98	24		1																							

Run no.	29				J	4	17	6	21	2	10	12	11	16	20	19	13	22	18	9	15	7	8	5	14	3	1	23	24
w Before	141	i	Li	Di	Xj	18	2	10	12	17	6	1	1	2	2	5	1	2	7	4	1	1	8	1	4	1	3		
w After	77	1	0.69	2	Pj: Aij												1				1								
Sum(Tj)	16.07	2	0.92	37									2					2			1			2	3		6		
Sum(Li·OSi)	7.28	3	0.94	121				1	2	2	1				3	1	1	4	3								2		
Total Waste	23.35	4	1.23	7															1										
%waste	2.189	5	1.30	31			1					3		3						1			1	3			2		
Sum(Xj)	109	6	1.72	2																		1				1			
Dice Method	2	7	2.07	18						1			1																
Sum(Wj)	97	8	2.27	11			2				1															1			
nDiffPat	22	9	2.98	11											1	1									1				
		10	4.14	8			1								1		2				1	2							
		11	4.24	16														1			1		1	1	1				
		12	4.34	16																2			1						
		13	5.95	9								1	1						1										
		14	5.97	25						1				1		1										1			
		15	6.63	6							1																		
		16	8.07	12					1																				
		17	8.94	10				1																					
		18	9.49	18		1																							

Run no.	28				J	19	10	2	8	16	22	23	17	15	11	13	14	5	3	12	6	18	9	4	7	21	20	1	24
w Before	151	i	Li	Di	Xj	13	6	4	9	3	28	1	4	1	11	9	2	2	3	1	1	9	1	1	1	1	2	2	
w After	70	1	0.66	35	Pj: Aij			1				1					3	2	2	1	1	1					1	1	
Sum(Tj)	10.87	2	0.86	84				1			1	2	1	1			1	6		3			1		1	10	6	2	
Sum(Li·OSi)	6.67	3	0.87	41			1						1	1	1							2		1	1		1		
Total Waste	17.54	4	1.35	4				1																					
%waste	1.549	5	1.40	3								1													1	1			
Sum(Xj)	115	6	1.90	33							1			1					1				1						
Dice Method	2	7	2.72	16						1			3								1								
Sum(Wj)	106	8	2.97	0																									
nDiffPat	23	9	3.29	24												2				2	2						1		
		10	3.39	28												1		1	2			1						1	
		11	3.40	1																					2				
		12	4.19	11																		1						1	
		13	6.22	2								1		1															
		14	6.87	1																			1						
		15	7.13	37				1		1	1						1												
		16	9.09	18			1								1									1					
		17	9.56	9					1																				
		18	9.96	13		1																							

Run no.	27				J	5	2	17	7	12	11	3	18	15	14	4	13	1	10	19	20	16	9	8	6	21	22	23	24
w Before	150	i	Li	Di	Xj	3	4	19	1	11	3	10	1	12	2	1	5	1	1	1	11	2	6	5	2				
w After	83	1	0.33	64	Pj: Aij		4			1		2			4		2		1				1						
Sum(Tj)	6.99	2	0.74	1												1													
Sum(Li·OSi)	2.64	3	0.87	95				2						2							2		1	1					
Total Waste	9.63	4	1.02	11												1		5		3					1				
%waste	0.963	5	1.09	13													1					1	1						
Sum(Xj)	101	6	1.35	16							3								1				1						
Dice Method	2	7	2.00	9									2											1	1				
Sum(Wj)	90	8	2.33	19										1	1									1					
nDiffPat	20	9	2.95	12								1										1							
		10	3.47	4					1										1	2									
		11	3.49	18		1															1				2				
		12	4.75	18														1	1		1			1					
		13	5.91	16							1		1	1															
		14	5.96	2																		1							
		15	6.35	22		1			1			1			1								1						
		16	8.21	25				1								1	1												
		17	8.68	4			1																						
		18	9.35	11						1																			

Run no.	76				J	2	5	1	16	8	10	12	15	4	7	3	13	6	9	14	11	17	18	19	20	21	22	23	24
w Before	88	i	Li	Di	Xj	10	26	8	4	4	5	3	1	10	8	8	2	1	5	3	1								
w After	40	1	0.32	39	Pj: Aij	1	1			1			1																
Sum(Tj)	4.84	2	0.62	86						1	1	1	4	1	1	2	5	2		2								
Sum(Li·OSi)	0.64	3	0.76	35			1			2											1								
Total Waste	5.48	4	1.50	10		1																						
%waste	0.557	5	1.61	15							1						2	2										
Sum(Xj)	99	6	1.99	15						1			1																
Dice Method	2	7	2.07	20											2		1				2								
Sum(Wj)	84	8	2.82	5													1			1									
nDiffPat	16	9	3.31	15					3											1									
		10	3.67	19				1			2							1											
		11	3.82	8												1												
		12	3.86	13								2	1				1			1	1								
		13	5.13	9									1		1													
		14	5.53	23										1		1			1										
		15	6.29	8				1																				
		16	7.82	0																								
		17	8.16	14		1				1																		
		18	8.83	26			1																					

Run no.	75				J	3	17	5	21	12	2	8	6	7	13	18	11	16	19	15	4	22	9	20	1	10	14	23	24
w Before	137	i	Li	Di	Xj	1	10	39	1	3	14	4	1	1	1	2	2	2	1	1	4	1	8	1	2	3	3		
w After	69	1	0.22	61	Pj: Aij	5	1			6			6	2		5		4	1	3		5			1	2			
Sum(Tj)	9.18	2	0.33	86					2		3	3		2	1			1			1		4						
Sum(Li·OSi)	6.93	3	0.72	13																9	1								
Total Waste	16.11	4	1.22	14							1						2			1			2					
%waste	1.558	5	1.43	17							1	1							2	1			3			1		
Sum(Xj)	105	6	1.78	9																					3		1		
Dice Method	2	7	2.34	34						1	1		1			1						1			1	1		
Sum(Wj)	94	8	3.01	1					1																			
nDiffPat	22	9	3.27	5												2							1					
		10	3.61	8													1								2			
		11	4.44	11		2								2	1				1						1		1		
		12	4.88	21			2						1															
		13	5.22	2											1				1									
		14	6.30	24					1	1		1					1	1			1		1						
		15	6.65	14							1																		
		16	8.63	0																								
		17	8.87	1																		1						
		18	9.81	39				1																				

Run no.	74				J	13	3	9	14	11	5	17	8	12	16	19	6	4	18	20	15	7	10	1	2	21	22	23	24
w Before	133	i	Li	Di	Xj	16	17	16	2	1	5	1	3	6	7	4	1	7	2	2	3	1	1	3	3				
w After	94	1	0.36	62	Pj: Aij			1	1		1	1	1	2		2									3	2				
Sum(Tj)	5.67	2	0.43	62		1		1	2	1		1			1	1		1	3										
Sum(Li·OSi)	0	3	0.88	36					3	1	1		1				1			4	1	1	2		2				
Total Waste	5.67	4	1.05	21							2										1		2	1	1				
%waste	0.565	5	1.25	6																	1			1					
Sum(Xj)	101	6	1.83	13								5			1		1												
Dice Method	2	7	2.70	20										2		1			2									
Sum(Wj)	72	8	2.98	1																		1						
nDiffPat	20	9	3.31	19						1	2								1					2					
		10	3.41	10									1				1				2							
		11	3.88	23				1						1			1												
		12	4.26	7														1										
		13	5.31	27				1		1			1					1										
		14	6.14	8					1						1						1	1						
		15	6.47	5																1					1				
		16	7.72	7											1														
		17	9.51	16		1																						
		18	9.78	17			1																					

Run no.	73				J	3	7	17	2	14	5	19	15	9	22	10	21	16	12	8	18	20	13	11	4	6	1	23	24
w Before	158	i	Li	Di	Xj	9	1	20	18	3	2	2	1	1	5	3	1	5	7	1	1	1	2	1	6	5	6		
w After	74	1	0.39	34	Pj: Aij		1			1				1	2				1	1						1	1		
Sum(Tj)	6.36	2	0.44	115				3	1			1			2	1				1	2	3			1	2			
Sum(Li·OSi)	3.47	3	0.95	11						1													4		6				
Total Waste	9.83	4	1.57	16													1						2		2			
%waste	0.983	5	1.79	10														2										
Sum(Xj)	101	6	1.90	14											1						1	3						1	
Dice Method	2	7	2.06	16										3								1								2	
Sum(Wj)	88	8	2.08	12													4							2			1	
nDiffPat	22	9	3.09	12		1										1												
		10	3.41	26						1			1	1								1		2			2	1	
		11	4.41	7															1									
		12	4.73	7			2					2										1						
		13	5.20	11						1									1	1								
		14	6.40	20									1		1	1		1							1			
		15	6.88	9		1																						
		16	8.67	20				1																					
		17	9.37	18					1																				
		18	9.71	2							1																	

Run no.	72				J	2	3	8	15	9	13	5	6	10	11	18	4	16	7	14	19	17	12	1	20	21	22	23	24
w Before	114	i	Li	Di	Xj	10	16	14	5	3	2	9	1	1	1	1	2	8	3	11	9	3	1	6					
w After	62	1	0.21	74	Pj: Aij		1	2	1	2	2	1	4	2						1								
Sum(Tj)	7.63	2	0.78	77						2	1				5						1	5		2	1					
Sum(Li·OSi)	2.31	3	0.79	9													3					1							
Total Waste	9.94	4	1.12	16					1								1					1		1					
%waste	0.947	5	1.65	15															2			1		1					
Sum(Xj)	106	6	1.70	9														1					1						
Dice Method	2	7	2.80	9						1	2					2												
Sum(Wj)	93	8	3.05	27								1									2								
nDiffPat	19	9	3.05	4							1				2													
		10	3.92	20									1					1		1								
		11	4.00	0																								
		12	4.31	20					2					1		1		1										
		13	5.07	16						1			1	1						1								
		14	6.43	11													1					1		1					
		15	6.70	13								1							1				1						
		16	9.44	14				1																					
		17	9.72	16			1																						
		18	9.84	10		1																						

Run no.	71				J	16	4	12	5	17	7	8	2	10	13	11	9	1	14	6	3	15	18	19	20	21	22	23	24
w Before	138	i	Li	Di	Xj	2	8	4	2	10	14	13	6	4	3	3	7	7	6	3	1	1							
w After	66	1	0.41	55	Pj: Aij	1						2	2	2				1											
Sum(Tj)	2.66	2	0.42	60			2	2			1		1	1	2				1									
Sum(Li·OSi)	0	3	0.50	45									1		3		1	1	2	1		1						
Total Waste	2.66	4	1.22	9					1								1											
%waste	0.284	5	1.47	17			1									3													
Sum(Xj)	94	6	1.50	14								1											1						
Dice Method	2	7	2.27	1																			1							
Sum(Wj)	79	8	2.57	18														1			2				1						
nDiffPat	17	9	2.92	21												3		1			1										
		10	3.95	27		1		1			1							1										
		11	4.21	3																		1								
		12	4.57	10						1																		
		13	5.21	7				1														1								
		14	5.40	11						1												1						
		15	5.62	22		1					1									1										
		16	7.65	25			1					1			1							1								
		17	8.23	13									1						1											
		18	8.77	2					1																			

Run no.	26				J	3	15	2	16	7	5	8	4	9	19	12	18	10	13	14	6	11	17	1	20	21	22	23	24
w Before	109	i	Li	Di	Xj	22	5	13	12	1	1	1	19	1	4	1	2	6	7	1	2	1	1	6					
w After	66	1	0.43	73	Pj: Aij		2		1	1		1	1	1		3				2					2					
Sum(Tj)	9.13	2	0.52	7				1																						
Sum(Li·OSi)	5.34	3	0.95	80			2		3	1					1		2				3	8			1					
Total Waste	14.47	4	1.11	16											1	1		2				1							
%waste	1.384	5	1.43	7										2								5								
Sum(Xj)	106	6	1.48	17													1	1	1					2	1					
Dice Method	2	7	2.02	11							1					1			1			1	1						
Sum(Wj)	70	8	2.39	7						1		4											1							
nDiffPat	19	9	3.15	22													1	2	1			1								
		10	3.47	21									1				1												
		11	3.72	1																		1							
		12	3.96	18							2				2	1			1											
		13	5.01	1																			1						
		14	6.10	20						1			1																	
		15	6.71	19					1					1										1					
		16	7.21	5			1																					
		17	9.16	13				1																				
		18	9.81	22		1																						

Run no.	25				J	2	1	10	17	8	14	6	7	9	11	15	19	16	21	18	12	4	13	3	5	20	22	23	24
w Before	141	i	Li	Di	Xj	12	14	1	4	16	1	6	3	15	1	2	5	2	2	1	1	1	3	4	1	9			
w After	68	1	0.48	137	Pj: Aij	2			1		1		2	2		1	1			4	2	4	2	4		4			
Sum(Tj)	9.03	2	0.53	5												2	1						1				1			
Sum(Li·OSi)	3.63	3	0.79	18							1						2	2			2	1								
Total Waste	12.66	4	1.51	8														1						1						
%waste	1.232	5	1.66	15										1							1								
Sum(Xj)	104	6	1.68	17							1		1													1		1			
Dice Method	2	7	2.53	9							1	1							1										
Sum(Wj)	86	8	2.88	17						1																1			
nDiffPat	21	9	3.17	14					3										1											
		10	3.43	1				1																				
		11	3.68	12									2							2			2						
		12	4.45	27		2					1				2															
		13	6.39	6																	1	1			1					
		14	6.39	18				1									1	1							1	1			
		15	7.02	16						1																		
		16	7.38	26								1		1		1							1						
		17	7.58	0																								
		18	9.84	14			1																					

Run no.	24				J	10	5	4	8	18	17	19	16	20	21	3	6	12	23	24	1	9	22	7	14	15	13	2	11
w Before	180	i	Li	Di	Xj	7	7	14	7	16	1	6	1	10	5	3	1	3	3	1	1	3	2	3	1	6	1	2	1
w After	101	1	0.24	30	Pj: Aij	1					1	1		1			2		1	1									1	2
Sum(Tj)	8.77	2	0.67	61					1	1		1		2	1						4			1					
Sum(Li·OSi)	5.43	3	0.99	69			1		2	2	1				1			1	1	1			1							1
Total Waste	14.2	4	1.32	19		1								2				1					1			2			2	
%waste	1.371	5	1.38	16																						2	2	1		1
Sum(Xj)	105	6	1.53	5							1											1	1						
Dice Method	2	7	2.73	19				1										3			1								1		
Sum(Wj)	102	8	2.94	15															3	1	2								2		
nDiffPat	24	9	3.30	6								1																		
		10	3.66	16					2				2															
		11	4.44	17			2									1												
		12	4.60	7																					2	1				
		13	5.42	3													1												
		14	5.76	9								1							1									
		15	7.12	28				1			1										1	1				1		1	1
		16	7.29	18						1														1					
		17	8.19	5											1														
		18	8.41	17		1								1														

Run no.	23				J	4	2	10	5	14	18	16	11	6	9	7	12	19	13	1	3	8	17	15	20	21	22	23	24
w Before	130	i	Li	Di	Xj	14	14	1	12	2	6	3	1	12	1	11	2	2	1	1	13	3	1	4	1				
w After	78	1	0.57	83	Pj: Aij		1		2	3		1				2		1					4	2					
Sum(Tj)	10.14	2	0.57	25			1			1					4		1					1								
Sum(Li·OSi)	5.23	3	0.88	52		1					1	1							7	1			2	1				
Total Waste	15.37	4	1.37	15																3		1							
%waste	1.486	5	1.92	9						2					4				1										
Sum(Xj)	105	6	1.93	16								1	1	1			1												
Dice Method	2	7	2.07	15		1		1																						
Sum(Wj)	92	8	2.58	17							1					1												
nDiffPat	20	9	2.63	8																			2			2				
		10	3.78	20				1		1			1							1	1		1		1				
		11	3.94	15															1		1		1						
		12	4.15	5				1					1									1								
		13	6.28	11														1											
		14	6.52	9							1	1																	
		15	6.96	20		1											1							1					
		16	7.99	12										1																
		17	8.70	26			1		1																			
		18	9.08	2														1										

Run no.	22				J	6	12	17	19	18	14	8	2	10	20	13	5	21	22	7	16	11	15	1	9	4	3	23	24
w Before	158	i	Li	Di	Xj	1	9	1	32	8	14	1	1	1	4	3	2	1	1	5	1	3	2	3	10	1	3		
w After	82	1	0.38	37	Pj: Aij						1		1	1			2	1	3	3	1		1						
Sum(Tj)	8.98	2	0.73	68			1					1	2	1	8	5		5								1	1		
Sum(Li·OSi)	8.08	3	0.87	55				1	1			3					1					1			1	1	1		
Total Waste	17.06	4	1.09	15		1						6														1		1		
%waste	1.620	5	1.17	22									3				1						1	5					
Sum(Xj)	107	6	2.00	3																			1						
Dice Method	2	7	2.27	14															2				1		1				
Sum(Wj)	88	8	2.41	14							1																	
nDiffPat	22	9	3.15	12												2					3						1		
		10	4.15	20						1					1				1				1		1	1		
		11	4.25	1																							1		
		12	4.63	19			2						1															
		13	5.77	19						1								1								1				
		14	6.18	2																			1						
		15	7.13	19							1						1						1							
		16	8.84	7		1								1						1								
		17	8.95	32					1																				
		18	9.02	1				1																				

Run no.	21				J	3	13	9	17	16	19	18	15	6	5	7	14	20	10	2	11	21	12	8	4	1	22	23	24
w Before	149	i	Li	Di	Xj	17	1	5	9	1	4	4	6	9	3	11	2	1	1	1	3	10	1	3	1	6			
w After	83	1	0.22	62	Pj: Aij						1		1	1	1		2		1			2	3			2			
Sum(Tj)	3.16	2	0.39	61			1				1	1				3		1	2		1		1			2			
Sum(Li·OSi)	6.13	3	0.70	37			1				1	1		1			1				3		1	2	3				
Total Waste	9.29	4	1.27	29				2				1						3	1	1		1								
%waste	0.947	5	1.75	0																								
Sum(Xj)	99	6	1.98	11						2										3	1			1	1				
Dice Method	2	7	2.75	20							1										1		1	3	1					
Sum(Wj)	83	8	2.84	2														2										
nDiffPat	21	9	2.95	18										2				3												
		10	3.53	9										1														
		11	3.82	28					1			2	1		1				2										
		12	3.85	3																				1					
		13	5.52	22										1							1	1							
		14	5.89	9						1	1				1										1				
		15	6.14	9					1																			
		16	7.46	5				1																				
		17	8.78	18			1									1										1			
		18	9.98	17		1																						

Run no.	70				J	3	13	18	20	4	6	12	1	11	15	7	16	9	8	2	10	19	5	14	17	21	22	23	24
w Before	151	i	Li	Di	Xj	8	15	4	4	1	1	6	2	1	4	1	10	17	7	5	9	1	2	4	1				
w After	78	1	0.28	31	Pj: Aij	1			1		1		1			2				2			2		1				
Sum(Tj)	3.26	2	0.63	85		1	1		1	2					1			2		2		6	1						
Sum(Li·OSi)	8.1	3	0.76	44			1		2	1	1					3			1		1								
Total Waste	11.36	4	1.08	20										3			1			1					2				
%waste	1.115	5	1.24	1																			1						
Sum(Xj)	103	6	1.82	19		1					1						1												
Dice Method	2	7	2.39	4				1																					
Sum(Wj)	94	8	2.65	15								1									1								
nDiffPat	20	9	3.03	21									1		1				1					2					
		10	3.93	6						2														1					
		11	4.33	17														1											
		12	4.38	17														1											
		13	6.21	12											1				1			1							
		14	6.58	11									1	1							1								
		15	7.09	17							1					1	1			1									
		16	7.26	14		1						1																	
		17	7.56	11				1	1														1		1				
		18	8.57	15			1																						

Run no.	69				J	2	7	3	10	8	13	14	4	17	6	11	12	16	1	15	18	5	9	19	20	21	22	23	24
w Before	104	i	Li	Di	Xj	3	14	13	1	5	1	4	3	12	9	1	4	7	11	13	4	1	2						
w After	38	1	0.22	29	Pj: Aij		2				1	2	1						1										
Sum(Tj)	7.29	2	0.29	38				2	4			1			1														
Sum(Li·OSi)	6.29	3	1.00	93						1				4		1			3				3						
Total Waste	13.58	4	1.37	11							3										1	4							
%waste	1.273	5	1.53	15									2		1														
Sum(Xj)	108	6	1.64	14														2											
Dice Method	2	7	2.59	0																									
Sum(Wj)	94	8	2.60	28																2			1						
nDiffPat	18	9	2.77	12							2					2	2												
		10	3.43	5												1					1								
		11	4.40	19					2	2							1					1	1						
		12	4.78	16		1														1									
		13	5.18	7		1															1								
		14	6.00	12										1															
		15	6.70	21									1					1	1										
		16	8.10	9											1														
		17	9.23	17				1				1																	
		18	9.50	14			1																						

Run no.	68				J	9	5	1	12	15	18	6	10	13	21	19	16	3	17	11	20	4	8	7	23	22	14	2	24
w Before	192	i	Li	Di	Xj	2	10	10	1	18	1	3	5	3	4	1	4	1	3	6	7	1	1	1	3	4	3	8	
w After	91	1	0.48	107	Pj: Aij		3		1		5	4				1	1		2	5	2			4					
Sum(Tj)	8.84	2	0.62	44						2							2		1						1				
Sum(Li·OSi)	5.58	3	0.62	9										2						1									
Total Waste	14.42	4	1.37	12					2													1		2	1	1			
%waste	1.463	5	1.68	13		1												1					2			2			
Sum(Xj)	100	6	1.96	15				1							1							1							
Dice Method	2	7	2.67	1																			1						
Sum(Wj)	99	8	2.76	34				1				1				1					2				1		1		
nDiffPat	23	9	3.29	5									1																
		10	3.48	21							1							1		2	1								
		11	3.96	10							1				2								1						
		12	4.68	9														1										1	
		13	5.22	29				1				1												1	1	1		1	
		14	6.67	8					1				1			1						1							
		15	7.11	3																							1		
		16	8.18	6		1											1												
		17	8.41	13			1												1										
		18	8.64	21						1				1															

Run no.	67				J	1	19	10	6	12	20	5	3	21	16	18	17	15	11	14	4	7	9	8	13	2	22	23	24
w Before	166	i	Li	Di	Xj	3	6	1	1	15	18	9	13	5	4	1	1	1	1	2	7	1	6	2	2	1			
w After	69	1	0.60	80	Pj: Aij					3									1		1	1	3	2	3	1			
Sum(Tj)	1.82	2	0.61	59			2					2	1	1		3		2	1	2		1							
Sum(Li·OSi)	8.35	3	0.92	21		5									1									1	1				
Total Waste	10.17	4	1.44	13										1		1					1								
%waste	1.027	5	1.46	13									1																
Sum(Xj)	100	6	1.82	14				4								1									4	1			
Dice Method	2	7	2.15	16											3					1		1				1			
Sum(Wj)	44	8	2.62	10											1									3					
nDiffPat	21	9	2.66	14				1													1		1						
		10	4.37	21					1			2							2										
		11	4.59	1													1												
		12	4.71	18							1					1													
		13	5.29	30		1					1						1				1					1			
		14	5.54	7					1														1						
		15	6.63	3																1		1							
		16	7.93	18									1	1															
		17	8.20	15						1																			
		18	8.75	7			1											1											

Run no.	66				J	2	10	15	9	5	8	13	7	4	11	12	16	19	20	17	18	6	14	1	3	21	22	23	24
w Before	117	i	Li	Di	Xj	1	22	2	4	8	9	6	1	5	5	6	1	5	5	8	1	1	3	5	8				
w After	66	1	0.23	52	Pj: Aij	2	2	1	2				1		1		2	1				1							
Sum(Tj)	9.39	2	0.57	50							1	2			1	1				1				2					
Sum(Li·OSi)	8.49	3	0.84	58		1		1			1	3	4	1									3	1	1				
Total Waste	17.88	4	1.26	6		1													1										
%waste	1.716	5	1.72	13														2			3								
Sum(Xj)	106	6	1.83	21		1				2				1															
Dice Method	2	7	2.22	8																1									
Sum(Wj)	106	8	2.92	15				3			1																		
nDiffPat	20	9	3.18	17					1										1				1	1					
		10	4.20	12																		1	1		1				
		11	4.63	13												2	1												
		12	4.83	15													1				1			1	1				
		13	5.43	1																		1							
		14	5.48	15		1					1								1										
		15	6.30	24					1	1		1	1					1											
		16	7.16	13										1						1									
		17	9.18	5											1														
		18	9.46	22			1																						

Run no.	65				J	1	3	12	6	7	19	18	5	17	10	4	16	22	15	8	14	11	9	20	21	2	13	23	24
w Before	147	i	Li	Di	Xj	15	5	13	1	1	12	2	3	1	4	2	1	1	4	8	4	5	14	3	3	2	3		
w After	81	1	0.62	43	Pj: Aij						1	2	2		1		2							5					
Sum(Tj)	7.49	2	0.73	51				1		1	1			2			12		1					1		2			
Sum(Li·OSi)	0	3	1.00	66					1				1						1	1	4		2		2				
Total Waste	7.49	4	1.61	24			3											4							1	1			
%waste	0.705	5	1.80	2								1																	
Sum(Xj)	107	6	1.80	14																			1						
Dice Method	2	7	2.13	13										4											3				
Sum(Wj)	88	8	2.90	12					1	2					1							1							
nDiffPat	22	9	3.00	15									1		1					1									
		10	3.46	28						1		2			1			1	1			2				2			
		11	3.95	3																							1		
		12	4.75	9									1			1			1										
		13	5.14	7			1									1													
		14	5.95	16					1											1	1						1		
		15	6.17	17																			1	1					
		16	8.65	12							1																		
		17	9.03	13				1																					
		18	9.93	15		1																							

Run no.	20				J	11	17	4	18	19	10	5	8	14	2	15	7	12	13	16	6	21	9	20	1	3	22	23	24
w Before	165	i	Li	Di	Xj	2	7	14	7	5	1	1	4	5	2	5	1	5	1	1	13	1	11	2	9	3			
w After	91	1	0.21	45	Pj: Aij	1			1	1		7	3			1	1		1	1			1	1		1			
Sum(Tj)	7.45	2	0.44	98		2				4		2		1	1	1		1		2	1	1	2	1	1	2			
Sum(Li·OSi)	6.67	3	0.98	17					1														1						
Total Waste	14.12	4	1.46	7									1		1				1	1									
%waste	1.432	5	1.71	23		1					1							2	1	1					1				
Sum(Xj)	100	6	1.89	10			1													3									
Dice Method	2	7	3.09	16												3						1							
Sum(Wj)	90	8	3.23	9													2		2			2				1			
nDiffPat	21	9	3.29	15								1					1				1								
		10	3.87	20				1			1			1															
		11	4.36	18					2		1	1												1					
		12	4.97	2																				1					
		13	5.67	8										1												1			
		14	6.07	14				1																					
		15	6.14	18														1			1								
		16	7.17	2		1																							
		17	7.77	9																					1				
		18	7.91	29			1			1			1		1								1						

Run no.	19				J	16	11	5	8	14	19	17	4	10	13	7	9	2	18	1	15	3	12	6	20	21	22	23	24
w Before	167	i	Li	Di	Xj	5	1	13	6	2	3	8	4	1	17	5	1	9	3	3	3	13	2	3					
w After	61	1	0.22	105	Pj: Aij		1	3			2	1	2	2	1		2	1	4	1									
Sum(Tj)	8.86	2	0.25	21		3														2									
Sum(Li·OSi)	0.44	3	0.89	34					1			1			1									1					
Total Waste	9.3	4	1.61	22														1				1							
%waste	0.920	5	1.69	7						1						1													
Sum(Xj)	102	6	1.96	11												1					2								
Dice Method	2	7	2.67	14								1		2									2						
Sum(Wj)	96	8	2.83	19			2								1														
nDiffPat	19	9	3.06	7									1											1					
		10	4.04	20			1							1				2											
		11	4.61	13		2											1						1						
		12	4.76	7							2						1												
		13	6.05	23											1						1			1					
		14	6.15	8								1																	
		15	6.30	9									1			1													
		16	8.19	15						1												1							
		17	8.92	9					1										1										
		18	9.28	16				1												1									

Run no.	18				J	6	11	1	16	9	15	10	17	21	3	19	4	18	14	2	13	20	8	12	5	7	22	23	24
w Before	159	i	Li	Di	Xj	8	6	7	6	6	1	8	2	1	6	18	1	4	3	1	3	2	3	5	10	2			
w After	72	1	0.22	43	Pj: Aij	1	1		2	1			1	1					2		1		1			2			
Sum(Tj)	5.36	2	0.43	13				1							1					2		1							
Sum(Li·OSi)	6.48	3	0.60	104				2	6	2			3	1	1					1		8		1	1	1			
Total Waste	11.84	4	1.00	11															1				1	1					
%waste	1.163	5	1.45	21			1										1	1							1				
Sum(Xj)	103	6	1.45	8								1																	
Dice Method	2	7	2.65	19									3										1		1				
Sum(Wj)	84	8	2.98	1							1																		
nDiffPat	21	9	3.02	20												1										1			
		10	4.18	9										1	1					2									
		11	4.76	11											1						1	1							
		12	4.86	20		2								1							1								
		13	5.30	10																					1				
		14	5.94	11					1														1			1			
		15	6.95	19							1					1													
		16	8.33	18			1	1																1					
		17	8.47	15						1		1					1												
		18	8.47	7														1	1										

Run no.	17				J	5	9	6	11	18	12	19	13	10	17	15	14	8	20	4	16	7	3	2	1	21	22	23	24
w Before	108	i	Li	Di	Xj	15	12	13	1	1	5	1	4	7	3	6	14	1	9	4	2	3	6	2	1				
w After	73	1	0.74	50	Pj: Aij					1	1	1			1	2	1			1		2	1						
Sum(Tj)	4.85	2	0.80	57							3						1	1	2				1	1	2				
Sum(Li·OSi)	7.67	3	0.89	53								7	2	1							4		4						
Total Waste	12.52	4	1.00	5																		1		1					
%waste	1.151	5	1.31	13									1					1		2									
Sum(Xj)	110	6	1.50	22					2			2							1	1	2				1				
Dice Method	2	7	2.25	8						1				1				2											
Sum(Wj)	74	8	2.82	9															1										
nDiffPat	20	9	3.29	23												1	1	1						1					
		10	3.44	17					2				2								1	1			2				
		11	4.08	15											1				1			1							
		12	4.89	8																			1	1					
		13	5.14	21											1		1			1									
		14	5.23	6												1													
		15	6.86	13						1	1			1															
		16	9.83	12			1																						
		17	9.90	15		1																							
		18	9.99	13				1																					

Run no.	16				J	4	2	17	14	16	18	3	11	15	20	13	7	9	19	12	8	10	1	5	6	21	22	23	24
w Before	118	i	Li	Di	Xj	2	17	3	2	15	23	5	8	1	8	3	5	1	1	8	1	1	4	3	4				
w After	52	1	0.89	31	Pj: Aij							1		2			1	7						4					
Sum(Tj)	20.94	2	0.92	76								1				9	1		1			3	2	7	2				
Sum(Li·OSi)	10.25	3	1.00	53									3		1				1				4		1				
Total Waste	31.19	4	1.30	5													1												
%waste	2.788	5	1.70	14				1								1				1									
Sum(Xj)	115	6	1.79	21																1					4				
Dice Method	2	7	2.01	5															4		1								
Sum(Wj)	80	8	2.73	26								3		3						1									
nDiffPat	20	9	3.04	9		1									1														
		10	3.46	18			1															1							
		11	3.77	11														1		1	1	1							
		12	4.13	11				2													1		1						
		13	5.92	8											1														
		14	6.54	17			1																						
		15	6.89	15		1							1				1												
		16	9.32	15						1																			
		17	9.63	23							1																		
		18	9.83	2					1																				

Run no.	15				J	7	14	18	3	20	2	8	15	4	9	10	6	21	19	13	1	17	16	11	12	22	5	23	24
w Before	164	i	Li	Di	Xj	1	6	3	5	4	2	7	12	8	18	1	3	2	12	1	1	5	2	6	1	9	1		
w After	97	1	0.33	34	Pj: Aij				1				1			1		2		2	1		1	1	1				
Sum(Tj)	7.65	2	0.63	47									1	2	1						1								
Sum(Li·OSi)	7.86	3	0.93	79			1		1			3			1	1		1	1					1		1	1		
Total Waste	15.51	4	1.49	11		1																2							
%waste	1.430	5	1.55	10							1															1			
Sum(Xj)	110	6	1.86	19			1						1												1				
Dice Method	2	7	2.71	13													2			2		1							
Sum(Wj)	100	8	3.16	14															1				1						
nDiffPat	22	9	3.24	13																			2			1			
		10	3.89	6				1												1					2				
		11	4.28	22												2						1		1		1			
		12	4.45	12													1				2			1			2		
		13	5.88	12															1										
		14	5.94	3				1																					
		15	7.08	25			1					1	1																
		16	8.38	23		1					1				1			1											
		17	8.73	13					1					1															
		18	9.68	4						1																			

Run no.	64				J	19	12	5	3	17	20	4	15	9	8	13	10	14	7	16	11	1	18	2	6	21	22	23	24
w Before	147	i	Li	Di	Xj	2	14	9	4	12	1	14	6	5	9	1	4	2	1	1	1	2	7	3	3				
w After	74	1	0.79	25	Pj: Aij			2	1																1				
Sum(Tj)	7.95	2	0.87	66						1	1	1						4			1			8	4				
Sum(Li·OSi)	7.24	3	0.92	69						1		3		1			2			2									
Total Waste	15.19	4	1.01	8																	1			3					
%waste	1.527	5	1.05	15								1							1										
Sum(Xj)	101	6	1.21	17			1											1		1									
Dice Method	2	7	2.31	20		1			1							2						1	1		1				
Sum(Wj)	85	8	2.55	14		3															1		1						
nDiffPat	20	9	2.56	6																		3							
		10	3.42	13					2											2					1				
		11	4.40	13									1	1					2										
		12	4.68	14										1	1														
		13	5.14	7																			1						
		14	5.27	15								1				1													
		15	5.30	18									1		1			1			1								
		16	8.13	16						1							1												
		17	8.39	9				1																					
		18	8.61	15			1				1																		

Run no.	63				J	1	11	10	16	15	17	5	6	3	8	9	2	4	13	12	7	14	18	19	20	21	22	23	24
w Before	89	i	Li	Di	Xj	7	4	1	23	8	8	10	2	9	3	10	1	4	1	9	1	2							
w After	45	1	0.28	9	Pj: Aij	2		1									1												
Sum(Tj)	6.55	2	0.73	77			2		1	1			3			2	1	3				1							
Sum(Li·OSi)	8.39	3	0.97	74			3	1	1	4											2	2							
Total Waste	14.94	4	1.14	19								1					3	2											
%waste	1.472	5	1.40	1																	1								
Sum(Xj)	103	6	1.96	20							1								1	1	1	1							
Dice Method	2	7	2.18	24				4					1	2															
Sum(Wj)	98	8	2.37	1															1										
nDiffPat	17	9	2.63	15											2					1									
		10	3.82	10												1													
		11	3.98	16							2																		
		12	4.70	14											1	1					1								
		13	5.36	19						1										1		1							
		14	5.53	17			1							1				1											
		15	5.54	4									1				1		1										
		16	8.20	23					1																				
		17	8.82	10								1																	
		18	9.38	7		1																							

Run no.	62				J	1	4	10	12	11	6	8	9	2	13	16	5	7	14	15	3	17	18	19	20	21	22	23	24
w Before	83	i	Li	Di	Xj	14	5	5	5	7	1	4	8	5	8	9	1	3	8	18	3								
w After	41	1	0.23	11	Pj: Aij							1			1		3												
Sum(Tj)	8.28	2	0.45	128			4	4			2					1		1	1	3	4								
Sum(Li·OSi)	5.79	3	0.54	21														1		1									
Total Waste	14.07	4	1.16	18			1						1	1															
%waste	1.371	5	1.66	11										1				1			1								
Sum(Xj)	104	6	1.97	11							1					1	1												
Dice Method	2	7	3.04	8															1										
Sum(Wj)	95	8	3.13	18						2		1																	
nDiffPat	16	9	3.32	14		1																							
		10	3.67	15						1							2	2											
		11	4.87	20					1						2														
		12	4.97	5					1																				
		13	6.46	15								1							1		1								
		14	6.48	14		1																							
		15	7.02	11			1				1			1															
		16	7.56	9												1													
		17	8.07	23				1												1									
		18	8.84	8									1																

Run no.	61				J	19	9	4	21	16	15	6	17	14	20	11	3	13	22	12	5	18	10	8	2	1	7	23	24
w Before	194	i	Li	Di	Xj	19	5	2	1	1	9	3	5	4	1	1	14	1	1	9	3	2	1	9	5	3	4		
w After	92	1	0.42	75	Pj: Aij	1				1		1	2			2		2		1	4				2	1	1		
Sum(Tj)	2.27	2	0.58	43					1	1	2	1		4	1										1	1			
Sum(Li·OSi)	5.34	3	0.68	42		1	1								1			1	3				2	1		1			
Total Waste	7.61	4	1.62	13					2													1		1					
%waste	0.744	5	1.71	8															1			1			1				
Sum(Xj)	103	6	1.76	19														1	1	2									
Dice Method	2	7	2.27	14												1		1			1	1				1	1		
Sum(Wj)	81	8	2.99	8						3													1				1		
nDiffPat	22	9	3.05	18				1					3		1														
		10	3.89	0																									
		11	4.32	19													1	1									1		
		12	4.40	21							2								1			1							
		13	5.65	16											1		1						1						
		14	6.05	16					1											1	1					1			
		15	6.87	8				1								1									1				
		16	7.68	13										1										1					
		17	8.89	22		1						1																	
		18	9.31	5			1																						

Run no.	60				J	1	4	5	9	6	12	7	10	13	3	11	16	17	14	15	8	2	18	19	20	21	22	23	24
w Before	91	i	Li	Di	Xj	31	4	8	5	10	1	2	6	2	9	6	6	7	5	3	1	2							
w After	49	1	0.29	27	Pj: Aij	1			1					1															
Sum(Tj)	9.54	2	0.61	17												1			1			3							
Sum(Li·OSi)	3.19	3	0.77	116				1		1	1		3			2	1	4	6	1									
Total Waste	12.73	4	1.18	18								2				1		1			1								
%waste	1.193	5	1.29	13			1						1							1									
Sum(Xj)	108	6	1.54	9							3						1												
Dice Method	2	7	2.48	21				1				1					1				1	2							
Sum(Wj)	97	8	3.16	1																	1								
nDiffPat	17	9	3.18	18									2							1	1	1							
		10	3.94	0																									
		11	4.56	23						2	1			1															
		12	4.76	17											1				1	1									
		13	5.11	19								1		1	1		1												
		14	5.74	7														1											
		15	6.65	14				1								1													
		16	8.67	4			1																						
		17	9.55	31		1																							
		18	9.70	5					1																				

Run no.	59				J	3	6	11	2	5	1	10	8	20	18	17	16	9	19	7	15	13	4	14	12	21	22	23	24
w Before	121	i	Li	Di	Xj	2	1	2	16	2	13	3	11	5	1	1	12	1	3	2	1	10	2	5	5				
w After	86	1	0.21	71	Pj: Aij	1	1			1		1	3				1	3				1			1				
Sum(Tj)	3.34	2	0.80	47									2	1									3	3					
Sum(Li·OSi)	5.22	3	1.00	42					1								2		1										
Total Waste	8.56	4	1.07	9															1	2	4								
%waste	0.881	5	1.28	17										1	1						2	1							
Sum(Xj)	98	6	1.34	14							1					1													
Dice Method	2	7	2.24	26					1															1	1				
Sum(Wj)	68	8	3.05	3								1																	
nDiffPat	20	9	3.14	11																	1	1							
		10	3.91	5														1		2									
		11	4.30	5		1									1	2													
		12	4.33	30			1			1	2				1														
		13	5.36	20		1				1								1				1		1					
		14	5.44	1			1																						
		15	6.73	19					1			1																	
		16	7.51	7																			1		1				
		17	7.77	31									1	1			1		1										
		18	9.93	2				1																					

Run no.	14				J	15	12	18	6	16	9	4	19	20	21	8	10	5	17	2	7	11	14	3	13	1	22	23	24
w Before	164	i	Li	Di	Xj	3	4	20	2	4	5	9	13	1	1	1	1	1	7	6	7	5	5	3	1	2			
w After	90	1	0.23	109	Pj: Aij	1		2	4	2			1		1	1			1		1	4			1				
Sum(Tj)	4.84	2	0.73	32			2		1			1		1	1					1			1						
Sum(Li·OSi)	7.32	3	0.83	19							2			1							1				1				
Total Waste	12.16	4	1.21	15									1					1								1			
%waste	1.219	5	1.33	15													1				2								
Sum(Xj)	101	6	1.81	10											2									2	1	1			
Dice Method	2	7	2.07	24					1	2	1			1		1								2		1			
Sum(Wj)	77	8	2.23	5												1	1							1	1				
nDiffPat	21	9	2.94	11																1			1						
		10	4.17	5																		1							
		11	4.37	18								1						2	1										
		12	4.90	17								1										1			1	1			
		13	5.38	13						1					1	1			1										
		14	6.27	12							1						1			1									
		15	6.28	15					1					1							1		1						
		16	8.52	17			1						1																
		17	9.41	20				1																					
		18	9.68	3		1																							

Run no.	13				J	12	16	4	18	20	8	6	14	11	1	13	2	5	10	17	19	7	9	15	21	3	22	23	24
w Before	146	i	Li	Di	Xj	1	11	2	1	1	4	1	8	4	3	2	10	1	7	1	5	1	10	6	15	8			
w After	60	1	0.25	74	Pj: Aij		1		2	1	3		2	1			3				3								
Sum(Tj)	7.4	2	0.56	3								1	1				1	1											
Sum(Li·OSi)	13.77	3	0.56	83			1		1					1		4		3		10	1		2	1	1				
Total Waste	21.17	4	1.45	13										1								1				1			
%waste	2.119	5	1.57	20			1			2		1												1					
Sum(Xj)	102	6	1.73	7											2							1							
Dice Method	2	7	2.41	27							1		1												1				
Sum(Wj)	91	8	3.07	7															1										
nDiffPat	21	9	3.27	6				3																					
		10	3.42	1		1																							
		11	4.23	17																1						2			
		12	4.41	22					2														2						
		13	6.52	13		1				1			1		1														
		14	6.79	12							1								1			1							
		15	6.91	15																					1				
		16	7.62	14			1									1		1											
		17	7.71	11								1		1										1					
		18	8.66	15													1				1								

Run no.	12				J	4	14	5	7	2	6	12	11	17	19	3	18	10	16	15	8	9	13	20	1	21	22	23	24
w Before	120	i	Li	Di	Xj	15	12	2	21	5	9	3	1	2	1	4	1	1	1	14	4	3	2	5	2				
w After	65	1	0.45	80	Pj: Aij					1	1	5	1	1		2	2		3		3	1	1		9				
Sum(Tj)	10.53	2	0.93	14					1				1																
Sum(Li·OSi)	16.81	3	1.00	66			2	1			1					1	3			1				2					
Total Waste	27.34	4	1.52	18						1							4					1	4						
%waste	2.597	5	1.71	15											2	1					1			1					
Sum(Xj)	108	6	1.74	7												1						1							
Dice Method	2	7	2.52	18									2	1						1									
Sum(Wj)	90	8	2.86	2															3										
nDiffPat	20	9	2.96	20		1												1							2				
		10	3.47	12									1					2			2		1						
		11	3.87	15							1	2																	
		12	4.65	13							1					1													
		13	6.29	8																		1		1					
		14	6.41	15											1					1									
		15	6.98	17		1								1															
		16	7.98	17			1			1																			
		17	8.74	21					1																				
		18	8.85	2				1																					

Run no.	11				J	4	8	12	1	16	15	10	13	17	2	14	11	7	9	3	6	5	18	19	20	21	22	23	24
w Before	103	i	Li	Di	Xj	9	11	2	17	18	3	6	2	1	2	8	6	7	1	1	3	7							
w After	59	1	0.44	53	Pj: Aij	1	1	1			4			2	1		1	1	1	1									
Sum(Tj)	6.13	2	0.56	29													3		1		1	1							
Sum(Li·OSi)	9.14	3	0.88	78						2		4		3				1	2			1							
Total Waste	15.27	4	1.09	8												1													
%waste	1.490	5	1.69	13													1			1	2								
Sum(Xj)	104	6	1.94	19			1								3					2									
Dice Method	2	7	2.07	18		1															1	1							
Sum(Wj)	76	8	2.26	0																									
nDiffPat	17	9	2.41	22			1									1			3										
		10	3.73	22		2							1		1														
		11	3.99	11														1		1	1								
		12	4.68	7														1											
		13	5.21	11			1																						
		14	6.19	7									1				1												
		15	6.48	22								1		1		1						1							
		16	8.23	21						1	1																		
		17	9.19	2				1																					
		18	9.74	17					1																				

Run no.	10				J	14	4	13	10	16	17	1	6	19	3	15	12	9	2	5	7	8	20	21	18	11	22	23	24
w Before	155	i	Li	Di	Xj	11	14	17	11	1	3	1	10	1	4	1	6	4	1	1	5	1	3	6	1	1			
w After	68	1	0.83	39	Pj: Aij				3					1	1	1			2										
Sum(Tj)	7.14	2	0.92	96			3			4		4		2		4	2	1	9				3		6				
Sum(Li·OSi)	6.61	3	0.98	25			1				1	1					1			1									
Total Waste	13.75	4	1.14	11									1							1									
%waste	1.353	5	1.52	5														1				1							
Sum(Xj)	103	6	1.73	24											2	1					2			1					
Dice Method	2	7	2.03	24				1														1		1					
Sum(Wj)	103	8	2.32	1																						1			
nDiffPat	21	9	3.22	15							1										2	2				1			
		10	3.58	7												1							2						
		11	4.32	11		1																							
		12	4.41	22									2												1	1			
		13	5.32	1								1																	
		14	5.66	18		1					1				1														
		15	6.22	21			1			1														1					
		16	7.17	7										1			1												
		17	7.47	15					1									1											
		18	7.80	18				1												1									

Run no.	9				J	21	19	3	2	6	7	11	18	15	5	10	17	14	20	13	16	8	9	1	12	4	22	23	24
w Before	139	i	Li	Di	Xj	7	13	11	1	3	4	2	10	5	3	11	5	1	2	2	1	3	7	7	1	4			
w After	78	1	0.67	49	Pj: Aij						1				1	3				1		2			1				
Sum(Tj)	5.97	2	0.72	57				1		1			1	1				3						3		1			
Sum(Li·OSi)	0	3	0.88	54			1	1			1								2	4	3	1		1	1				
Total Waste	5.97	4	1.38	5										1															
%waste	0.583	5	1.98	17								5											1						
Sum(Xj)	103	6	1.99	18					5					1			1					1							
Dice Method	2	7	2.02	18		1							1					1											
Sum(Wj)	77	8	2.21	18												1							1						
nDiffPat	21	9	2.36	4																						1			
		10	3.60	25									2						1		2				1				
		11	4.62	14						2					2				1										
		12	4.73	1																					1				
		13	5.78	29										1		1		1		1		1	1						
		14	5.80	0																									
		15	6.92	11																				1		1			
		16	7.91	12		1											1												
		17	8.40	15				1			1																		
		18	8.97	13			1																						

Run no.	58				J	4	3	13	14	18	1	10	9	8	7	2	6	16	20	5	15	12	17	19	11	21	22	23	24
w Before	146	i	Li	Di	Xj	1	4	23	2	6	1	14	1	1	13	4	7	3	2	4	1	3	10	1	2				
w After	79	1	0.26	71	Pj: Aij	1	1	1			1			1					1			3	3	1					
Sum(Tj)	4.93	2	0.42	27								1			1														
Sum(Li·OSi)	7.41	3	0.88	62			2			1	1		1		1	4			1	1			1	1					
Total Waste	12.34	4	1.36	12		2										1							1						
%waste	1.213	5	1.59	14													1				5				1				
Sum(Xj)	103	6	1.71	14						1							1								1				
Dice Method	2	7	2.05	18									1						1	1	1	2			2				
Sum(Wj)	84	8	2.58	19							2	1		1											1				
nDiffPat	20	9	3.18	3														1											
		10	3.34	18													2			1									
		11	3.70	18						2	1									1				1					
		12	4.97	4					2																				
		13	5.12	8												1						1		1					
		14	6.77	5														1	1										
		15	6.98	27		1						1	1	1									1						
		16	7.96	4			1																						
		17	8.66	13											1														
		18	9.61	23				1																					

Run no.	8				J	3	7	14	12	16	4	17	6	11	9	10	2	5	15	13	1	8	18	19	20	21	22	23	24
w Before	106	i	Li	Di	Xj	12	6	3	6	6	1	21	4	11	1	6	2	8	3	8	2	2							
w After	50	1	0.40	105	Pj: Aij		1	1	1		11	2		1	2		3		4		1	2							
Sum(Tj)	5.98	2	0.65	4									1																
Sum(Li·OSi)	7.82	3	0.72	51					1			1		2					1			1							
Total Waste	13.8	4	1.01	11		1																							
%waste	1.372	5	1.60	21			1								1	1	3				1								
Sum(Xj)	102	6	1.99	8																1									
Dice Method	2	7	2.79	8																1									
Sum(Wj)	91	8	2.93	18										1	1	1													
nDiffPat	17	9	3.27	14			1											1											
		10	3.83	12													1		2		1	1							
		11	4.16	8					1												1								
		12	4.65	20			1		1	1					1							1							
		13	5.22	25						1				1						1									
		14	5.46	7							1					1													
		15	6.68	8														1											
		16	8.42	21								1																	
		17	8.97	16		1							1																
		18	9.55	3				1																					

Run no.	57				J	3	1	9	2	17	5	14	13	7	12	11	15	16	8	10	4	6	18	19	20	21	22	23	24
w Before	123	i	Li	Di	Xj	8	11	32	1	1	1	1	5	7	7	6	2	6	3	3	7	1							
w After	79	1	0.34	98	Pj: Aij							2	8		2	2		3		4	1								
Sum(Tj)	10.04	2	0.35	20						3		6					3				1								
Sum(Li·OSi)	3.08	3	0.64	42		2			2		6		2	1								1							
Total Waste	13.12	4	1.10	16											1			1	1										
%waste	1.303	5	1.11	16					2						2														
Sum(Xj)	102	6	1.57	8								1				1						1							
Dice Method	2	7	2.14	16												1				1	1								
Sum(Wj)	54	8	2.18	7														1				1							
nDiffPat	17	9	3.25	17					2								1			2	1								
		10	3.92	11						1									1		1								
		11	4.38	18			1							1															
		12	4.98	11						1				1					1										
		13	5.61	19			1					1				1						1							
		14	5.70	8													1	1											
		15	6.00	13							1		1		1														
		16	8.71	8		1																							
		17	9.15	0																									
		18	9.70	32				1																					

Run no.	7				J	10	11	6	5	1	2	3	9	16	8	20	18	17	4	19	14	13	7	15	12	21	22	23	24
w Before	137	i	Li	Di	Xj	3	3	3	1	3	24	8	1	2	3	1	5	1	15	5	6	3	3	2	6				
w After	72	1	0.32	63	Pj: Aij		3	1	1	4			2	1		6		1			2			3	2				
Sum(Tj)	7.3	2	0.59	69					1			1	1	1			2	3		4			4	3	1				
Sum(Li·OSi)	8.89	3	0.75	28		1	1		1	1			1	1					1										
Total Waste	16.19	4	1.07	4					1													1							
%waste	1.680	5	1.30	3		1																							
Sum(Xj)	98	6	1.90	33				1	1		1				1									1					
Dice Method	2	7	2.26	10													1			1									
Sum(Wj)	98	8	2.55	9								1						1											
nDiffPat	20	9	2.59	21				3													2								
		10	3.49	6																		1	1						
		11	3.87	15															1										
		12	4.12	19			2							2							1		1						
		13	5.34	27					1									1	1	1		1		1					
		14	6.52	5													1												
		15	6.85	8								1																	
		16	7.93	31		1				1	1		1			1													
		17	8.02	3											1														
		18	8.73	6																					1				

Run no.	56				J	5	13	3	1	20	16	19	9	18	14	6	7	10	21	15	22	2	12	11	17	4	8	23	24
w Before	201	i	Li	Di	Xj	1	11	5	12	9	1	17	1	1	1	1	1	2	1	2	5	4	4	1	14	4	3		
w After	108	1	0.34	33	Pj: Aij	1				3	1		1			1					1								
Sum(Tj)	4.15	2	0.63	88		1	1	1	1		1	1	3				2	1	4				1		2				
Sum(Li·OSi)	7.75	3	0.83	39									1	2	2					1	1		1	3	1	2			
Total Waste	11.9	4	1.34	15							1				1	3				1		1	1						
%waste	1.192	5	1.45	10				1						1	1												1		
Sum(Xj)	101	6	1.70	15									4				1			3						1			
Dice Method	2	7	2.22	1		1																							
Sum(Wj)	86	8	2.72	31			1												1	1	2			1			2		
nDiffPat	22	9	3.11	8													1					1					1		
		10	3.39	15		2								2				1			1		1						
		11	3.81	23							2	1					1						1						
		12	4.76	2															1					1					
		13	5.53	23								1			1	1						1							
		14	5.98	2														1											
		15	6.63	15			1																			1			
		16	7.86	19				1																	1				
		17	8.93	9						1																			
		18	9.27	12					1																				

Run no.	6				J	5	15	2	7	3	14	9	8	11	17	12	4	13	10	6	1	16	18	19	20	21	22	23	24
w Before	101	i	Li	Di	Xj	2	12	9	13	4	1	1	2	8	8	1	10	1	6	10	9	14							
w After	36	1	0.45	52	Pj: Aij			1			2		1			1	2		1			1							
Sum(Tj)	8.26	2	0.65	50					2			1	1					1	1			1							
Sum(Li·OSi)	21.25	3	0.66	58			1	1		1			1			1				3									
Total Waste	29.51	4	1.04	9									1	1															
%waste	2.731	5	1.64	13					1																				
Sum(Xj)	111	6	2.00	18							1					1	1					1							
Dice Method	2	7	3.00	8											1														
Sum(Wj)	111	8	3.31	15		3															1								
nDiffPat	17	9	3.31	17																	2								
		10	3.49	18							2				2														
		11	3.95	20																2									
		12	4.51	2														2											
		13	5.36	0																									
		14	6.85	15												1						1							
		15	7.05	25					1				1				1												
		16	8.85	23				1						1					1										
		17	9.16	13			1					1																	
		18	9.31	4						1																			

Run no.	55				J	5	7	2	13	14	16	12	6	1	4	3	10	15	11	9	8	17	18	19	20	21	22	23	24
w Before	91	i	Li	Di	Xj	1	9	9	2	6	14	12	7	1	13	2	3	1	5	7	5								
w After	47	1	0.28	27	Pj: Aij	1		1			1			2			2			1									
Sum(Tj)	7.89	2	0.46	102		1		2	2		1		4	1	1		1			3									
Sum(Li·OSi)	8.9	3	0.84	31			1		2			1		1		1		3											
Total Waste	16.79	4	1.47	13													1		1		1								
%waste	1.761	5	1.81	14							1																		
Sum(Xj)	97	6	1.86	13		1						1						1											
Dice Method	2	7	2.81	23						1								2	3										
Sum(Wj)	96	8	3.03	13												3				1									
nDiffPat	16	9	3.22	4																	1								
		10	3.40	0																									
		11	3.54	22				1							1														
		12	4.55	18			2																						
		13	5.24	21				1												1	1								
		14	5.92	13											1														
		15	7.07	6						1																			
		16	7.25	12								1																	
		17	7.36	20		1			1		1						1												
		18	7.97	8									1	1															

Run no.	5				J	1	5	10	17	19	9	12	11	14	16	13	15	18	2	20	6	3	7	8	4	21	22	23	24
w Before	140	i	Li	Di	Xj	28	1	2	2	2	10	3	13	1	2	1	9	4	6	6	1	1	2	14	1				
w After	66	1	0.62	66	Pj: Aij		1		1	1		1		2	2			1				1	2	3	1				
Sum(Tj)	6.46	2	0.72	32							3														2				
Sum(Li·OSi)	8.67	3	0.85	62			2							2		2		3	6	1			1						
Total Waste	15.13	4	1.10	17																	2	1		1					
%waste	1.408	5	1.39	7														1			1		1						
Sum(Xj)	109	6	1.85	16			2													2			1						
Dice Method	2	7	2.45	24												1	1		2		1	1							
Sum(Wj)	91	8	2.88	9												2	1												
nDiffPat	20	9	2.91	7											3							2							
		10	3.96	4			1														1				2				
		11	4.67	19				1				2					1						1						
		12	4.67	17					2				1																
		13	5.28	15				1					1																
		14	5.43	10														1		1									
		15	7.03	15										1										1					
		16	7.83	10							1																		
		17	9.32	2						1																			
		18	9.83	28		1																							

Run no.	54				J	1	3	7	6	8	17	13	9	2	14	12	10	11	18	16	4	5	15	19	20	21	22	23	24
w Before	107	i	Li	Di	Xj	14	4	2	7	1	8	13	3	1	7	9	2	5	7	4	10	3	1						
w After	64	1	0.23	34	Pj: Aij	1	1	2		2	1		1	2															
Sum(Tj)	4.99	2	0.67	66					1				1	1		5		2											
Sum(Li·OSi)	6.26	3	0.75	60								2	1					3	2			2							
Total Waste	11.25	4	1.20	13											1		3												
%waste	1.126	5	1.22	19						1				2						4									
Sum(Xj)	101	6	1.47	8							1																		
Dice Method	2	7	2.07	3																		1							
Sum(Wj)	63	8	2.57	16											1						1								
nDiffPat	18	9	3.28	21												1					1		2						
		10	3.37	21			1									1			1				1						
		11	4.13	1						1																			
		12	4.15	18					1	1											1								
		13	5.12	18					1										1	1									
		14	6.23	7											1														
		15	6.39	15			1							1			1	1				1							
		16	8.30	24							1	1	1																
		17	9.51	2				1																					
		18	9.68	14		1																							

Run no.	4				J	1	14	3	15	12	19	10	13	16	18	17	5	11	9	4	6	7	8	2	20	21	22	23	24
w Before	127	i	Li	Di	Xj	5	1	12	1	9	16	8	10	1	5	2	12	2	2	1	3	4	1	2					
w After	78	1	0.22	77	Pj: Aij				2		2	1		2	4	2				1		2							
Sum(Tj)	3.4	2	0.72	18											1				1	1	1	1	1	1					
Sum(Li·OSi)	4.63	3	0.76	65					2	1	3							1				1							
Total Waste	8.03	4	1.21	17						1								1			1		1	1					
%waste	0.835	5	1.42	15										1		3						2							
Sum(Xj)	97	6	1.80	8								1																	
Dice Method	2	7	2.79	17													1	1		1				1					
Sum(Wj)	57	8	2.83	3																	1								
nDiffPat	19	9	3.13	20											1		1			2			1						
		10	4.08	12													1												
		11	4.63	15				1											2										
		12	4.94	13			2						1										1						
		13	5.03	10									1																
		14	5.24	14											1			1			1	1							
		15	5.28	16				1								1								1					
		16	7.28	16							1																		
		17	7.97	19					1	1		1		1															
		18	9.84	5		1																							

Run no.	53				J	4	11	20	7	3	6	21	12	9	17	8	19	15	18	13	10	14	16	1	2	5	22	23	24
w Before	142	i	Li	Di	Xj	6	18	3	5	17	3	1	7	2	1	11	6	6	1	2	3	8	4	1	1	2			
w After	88	1	0.31	20	Pj: Aij	1						1							3		1		1		1	1			
Sum(Tj)	6.1	2	0.34	25				3					1		1					1			1	1		1			
Sum(Li·OSi)	6.59	3	0.99	115				3	1		3	1			5	4	1		2	4		1	3			4			
Total Waste	12.69	4	1.03	10							1			1	1		1												
%waste	1.189	5	1.23	12																		1		1	3				
Sum(Xj)	108	6	1.87	18		1															4								
Dice Method	2	7	2.21	9														1			1			1					
Sum(Wj)	88	8	2.59	27								1					1	3		1									
nDiffPat	21	9	3.11	4																1				2					
		10	3.54	13										1	1				2			1							
		11	3.91	12		2																							
		12	4.24	15									1									1							
		13	5.37	17									1	1			1									1			
		14	5.98	19				1			1	1				1									1				
		15	6.36	4																			1						
		16	8.87	5					1																				
		17	9.86	17						1																			
		18	9.94	18			1																						

Run no.	3				J	18	5	8	1	20	19	17	3	7	13	21	9	4	22	11	10	2	15	6	14	12	16	23	24
w Before	177	i	Li	Di	Xj	7	2	2	1	6	5	1	1	4	18	8	12	8	1	8	1	4	2	8	1	3	6		
w After	61	1	0.68	48	Pj: Aij		1		3		3									2							2		
Sum(Tj)	14.06	2	0.83	35								1					1	1	2		1						2		
Sum(Li·OSi)	8.94	3	0.91	77				2	1	1	1		2		2	1								1	9	1			
Total Waste	23	4	1.37	14													1		1		1								
%waste	2.156	5	1.61	10			1													1									
Sum(Xj)	109	6	1.78	16								1	2										3	1	1				
Dice Method	2	7	2.11	8												1													
Sum(Wj)	97	8	3.30	16																		2		1					
nDiffPat	22	9	3.33	16								1		3												1			
		10	3.40	12														1				1							
		11	4.00	13				2				1												1					
		12	4.49	15						2			1										1						
		13	5.74	11														1								1			
		14	6.91	22							1					1			1	1									
		15	6.92	7					1																		1		
		16	7.69	20			1								1														
		17	7.77	13													1				1								
		18	9.96	7		1																							

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.

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. (2014) "Three-Step Solutions for Cutting Stock Problem of Construction Steel Bars." Korean Society of Civil Engineers Journal of Civil Engineering, 18(5), 1239-1247.

[2] Benjaoran, V. and Tabyang, W. (2013) "Construction Resource-Constrained Scheduling with Alternative Relationships Compared with the Conventional

Method.” The 2nd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials (SCESCM), September 23-25, 2014, Yogyakarta, Indonesia.

[3] Benjaoran, V. and Bhokha, S. (2013) “Cutting pattern generation for reinforcement bars using Intensive Search Algorithm.” The Thirteenth East Asia-Pacic Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13), September 11-13, 2013, Sapporo, Japan.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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).

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