

การจัดตารางการผลิตโดยวิธีการฮิวริสติกสำหรับการผลิตกระจกแผ่นเรียบ



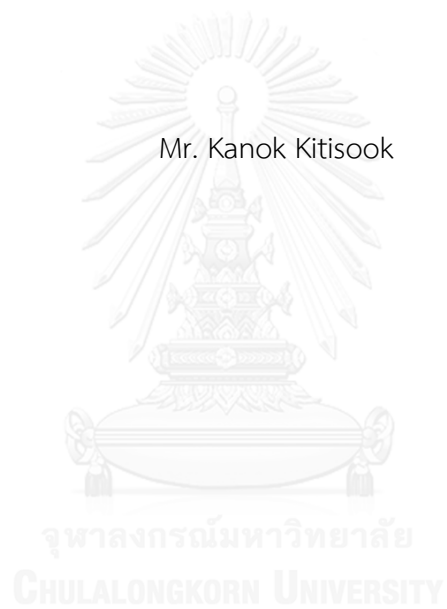
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Heuristic Based Scheduling for Float Glass Manufacturing

Mr. Kanok Kitisook



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจัดตารางการผลิตโดยวิธีการฮิวริสติกสำหรับการผลิต
	กระจกแผ่นเรียบ
โดย	นายกนก กิตติสุข
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. พิเศษณ์ จารุมนีโรจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริง ปรีชานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. พิเศษณ์ จารุมนีโรจน์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. สิริวิชญ์ สว่างนพ)

กนก กิติสุข : การจัดตารางการผลิตโดยวิธีการฮิวริสติกสำหรับการผลิตกระจกแผ่นเรียบ (Heuristic Based Scheduling for Float Glass Manufacturing) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
 หลัก: อ. ดร. พิเศษณ์ จารุมนีโรจน์, 66 หน้า.

การผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบโฟลทมีลักษณะเป็นปัญหาการวางแผนการผลิต (Production Problem) เพื่อค้นหาลำดับการผลิตที่ก่อให้เกิดเศษกระจกในระบบน้อยที่สุด ในงานวิจัยนี้ผู้ทำวิจัย ได้ทำการแปลงปัญหาดังกล่าว เป็น เป็นปัญหาการเดินทางของพนักงานขายแบบอสมมาตรที่มีกรอบเวลาจัดส่งที่จำกัด (ATSPTW) โดยกำหนดให้จุดแทนคำสั่งซื้อของลูกค้า ที่ประกอบไปด้วยข้อมูลขนาดของกระจก จำนวนแผ่นของกระจก และกำหนดส่งสินค้า ในขณะที่เส้นเชื่อมสามารถเปรียบเทียบกับค่าเดินทาง หรือความสูญเสียจากการเปลี่ยนคำสั่งซื้อ

ผู้วิจัยได้พัฒนาฮิวริสติกขึ้นจากพื้นฐานของ Variable Neighborhood Search (VNS) ผสมกับ 2-opt และ 3-opt เพื่อเป็นเครื่องมือในการค้นหาและพัฒนาคำตอบ แล้วจึงนำมาทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับการจัดงานที่มีกำหนดส่งมอบงานเร็วสุดก่อน (Earliest Due Date) และการหาคำตอบที่ดีที่สุดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

โดยผลลัพธ์ที่ได้จากฮิวริสติกก่อให้เกิดเศษกระจก (Scrap) น้อยกว่าวิธีการจัดงานที่มีกำหนดส่งมอบงานเร็วสุดก่อนโดยเฉลี่ยถึง 86.44% ทั้งสองวิธีใช้เวลาในการคำนวณ และจำนวนงานที่ส่งมอบไม่ทันที่ไม่ต่างกันมาก

ในขณะที่ผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างการหาคำตอบที่ดีที่สุดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับฮิวริสติก จะแสดงให้เห็นถึงความสำเร็จในการค้นหาคำตอบของทั้งสองวิธีการในปัญหาขนาดเล็ก แต่เมื่อขนาดของปัญหาขยายใหญ่ขึ้นคุณภาพคำตอบของฮิวริสติกจะลดลงเล็กน้อย โดยคุณภาพของคำตอบจะแตกต่างกับการหาคำตอบที่ดีที่สุดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เกิน 1.25 % โดยเฉลี่ย ในระยะเวลาการคำนวณที่ยอมรับได้ ในขณะที่วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถให้คำตอบได้เนื่องจากข้อจำกัดทางคอมพิวเตอร์ส่งผลให้ฮิวริสติกเหมาะสมในการแก้ปัญหาขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5770101221 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: FLOAT GLASS MANUFACTURING PROBLEM / TRAVELING SALESMAN PROBLEM WITH TIME WINDOW / VARIABLE NEIGHBORHOOD SEARCH / 2-OPT / 3-OPT

KANOK KITISOOK: Heuristic Based Scheduling for Float Glass Manufacturing.

ADVISOR: PISIT JARUMANEEROJ, Ph.D., 66 pp.

Float glass manufacturing problems concern a finding of cost minimizing production sequence such that total scraps are minimized. We show that these problems could be transformed into Asymmetric Traveling Salesman Problems with Time Window (ATSPTW), where a node is defined as a production order and an arc connecting two orders indicates changeover scraps and setup time. A variable arc exchange heuristic, whose concept is based on Variable neighborhood search using 2-opt and 3-opt exchange, is proposed for solving those large problem instances. The results from the proposed heuristic are compared with those of the earliest due date heuristic and the optimization model. The results from the proposed heuristic generate 84.66% less scrap than the earliest due date heuristic, with comparable number of late orders and computational time.

When compared to the results of the optimization model, both could successfully find the optimal solution to the problems of smaller size. When the problems get bigger, the solution quality of our proposed heuristic deteriorates, no more than 1.25% on average; but, with tractable computational time compared with that of the optimization model, whose solution could not be found due to a run-out-of-memory error.

Department: Industrial Engineering Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากปราศจากบุคคลต่างๆ ที่มีความสำคัญต่อวิทยานิพนธ์ดังต่อไปนี้

ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณ อ. ดร.พิศิษฐ์ จารุมณีโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาประจำวิทยานิพนธ์ ที่ได้มอบโอกาส ความรู้ แนวความคิด คำแนะนำ ตลอดจนกำลังใจการแก้ปัญหาอุปสรรคต่างๆ ในการสรรคสร้างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร.ดาริชา สุธีวงศ์ รศ. ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ ผศ. ดร.สิริง ปรีชานนท์ ประธาน และกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ผู้ให้คำแนะนำ และแนวคิด แง่คิดต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณรัชนิพร ยุกตปรีชา รุ่นพี่ที่ทำวิทยานิพนธ์ในหัวข้อ การออกแบบระบบสนับสนุนการวางแผนการผลิตกระจกแผ่นเรียบ ซึ่งมีลักษณะของวิทยานิพนธ์ใกล้เคียงกัน ผู้ที่ให้คำแนะนำ รวมถึงความช่วยเหลือในความเข้าใจลักษณะพื้นฐานของปัญหา

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ในห้อง Logistic and Industrial Management (LIM) ที่ให้คำแนะนำ และกำลังใจในการทำงาน และการใช้ชีวิตในช่วงระหว่างการเรียนปริญญาโท

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้กำเนิด รวมทั้งพี่สาว ที่คอยอบรมสอนสั่ง ให้กำลังใจ และเป็นแรงกระตุ้นให้ผู้ทำวิจัยมีพลังในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของกระจกแผ่นเรียบ.....	1
1.2 กระบวนการผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบโฟลท.....	4
1.3 วัตถุประสงค์.....	11
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	11
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	11
1.6 แนวทางการหาคำตอบ.....	11
1.7 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	12
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม.....	13
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 แนวทางการแก้ปัญหา.....	19
3.1 ลักษณะของปัญหา.....	19
3.2 สมมติฐาน.....	21
3.3 แนวทางการดำเนินงาน.....	22
3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model).....	26

3.5	นิยามศัพท์เฉพาะ.....	28
บทที่ 4	ฮิวริสติกสำหรับการวางแผนการผลิตในอุตสาหกรรมผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบโฟลท ..	29
4.1	ข้อมูลที่ใช้ประกอบการวางแผนการผลิต.....	29
4.2	กระบวนการเตรียมข้อมูลเพื่อนำเข้าคำนวณ.....	32
4.3	กระบวนการตัดสินใจของฮิวริสติก.....	40
4.4	ตัวอย่างการคำนวณของฮิวริสติก.....	44
บทที่ 5	ผลการดำเนินงานวิจัย.....	48
5.1	ข้อมูลนำเข้าที่ใช้ในการคำนวณ.....	48
5.2	ผลการเปรียบเทียบด้านเวลาและด้านคุณภาพของคำตอบ.....	48
5.3	การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	52
5.4	การวิเคราะห์ความไวของข้อมูลนำเข้า.....	54
5.4.1	การวิเคราะห์ความไวของขนาดแผ่นกระจก.....	54
5.4.2	การวิเคราะห์ความไวของค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทัน.....	57
บทที่ 6	สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	60
6.1	ผลการวิจัย.....	60
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	60
	รายการอ้างอิง.....	63
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	66

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1-1 กระบวนการผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบฟุโกต์.....	2
รูปที่ 1-2 กระบวนการผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบโฟลท.....	3
รูปที่ 1-3 ชุดห้กกระจก.....	5
รูปที่ 1-4 กระบวนการผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบโฟลท.....	6
รูปที่ 1-5 รูปแบบของเศษกระจกที่เกิดจากการจัดวางรูปแบบการตัด.....	7
รูปที่ 1-6 รูปแบบของเศษกระจกที่เกิดจากขอบการจับของเอตจโรล.....	7
รูปที่ 1-7 รูปแบบของเศษกระจกที่เกิดจากการเก็บไม้ทั้น.....	8
รูปที่ 1-8 รูปแบบของเศษกระจกที่เกิดจากการเปลี่ยนขนาด.....	9
รูปที่ 1-9 รูปแบบของเศษกระจกที่เกิดจากการเปลี่ยนสี.....	9
รูปที่ 2-1 ตัวอย่างการทำงานของ 2-opt Algorithm.....	15
รูปที่ 3-1 รูปแบบของเศษกระจกที่เกิดจากกระบวนการผลิต.....	20
รูปที่ 3-2 รูปแบบของเศษกระจกต่างๆ ที่สามารถเกิดขึ้นในหนึ่งสแนป.....	20
รูปที่ 3-3 ขั้นตอนการแก้ปัญหา.....	22
รูปที่ 3-4 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานของแนวทางการแก้ปัญหา.....	25
รูปที่ 3-5 สแนปและส่วนประกอบ.....	28
รูปที่ 4-1 ตัวอย่างการจัดวางรูปแบบการจัดสแนป.....	34
รูปที่ 4-2 Pseudo code แสดงขั้นตอนการทำงานของฮิวริสติก.....	42
รูปที่ 4-3 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำของฮิวริสติก.....	43
รูปที่ 5-1 แผนภูมิเส้นแสดงการเปลี่ยนความหนาที่ตัวอย่าง 60 คำสั่งซื้อ.....	52
รูปที่ 5-2 แผนภูมิเส้นแสดงการเปลี่ยนความหนาที่ตัวอย่าง 50 คำสั่งซื้อ.....	53

รูปที่ 5-3 แผนภูมิเส้นแสดงการเปลี่ยนความหนาที่ตัวอย่าง 60 คำสั่งซื้อ โดยไม่คำนึงถึงกรอบ
เวลา53



สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างข้อมูลนำเข้า	24
ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างข้อมูลนำเข้าหลังผ่านการคำนวณ	30
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงข้อมูลข้อจำกัดทางการผลิต	31
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงพารามิเตอร์ต่างๆ และความหมาย	32
ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างคำสั่งซื้อ	39
ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างขั้นตอนการคำนวณฮิวริสติก.....	44
ตารางที่ 4.6 ปริมาณของเศษกระจกจากการเปลี่ยนคำสั่งซื้อ i ไป คำสั่งซื้อ $i+1$ มีหน่วยเป็น inch^3	47
ตารางที่ 4.7 ระยะเวลาปรับตั้งเครื่องจักรจากคำสั่งซื้อ i ไปคำสั่งซื้อ $i+1$ มีหน่วยเป็นนาที (min)	47
ตารางที่ 4.8 กำหนดส่งมอบของกระจกในแต่ละคำสั่งซื้อ มีหน่วยเป็นนาที (min)	47
ตารางที่ 4.9 ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตกระจกในแต่ละคำสั่งซื้อ มีหน่วยเป็นนาที (min)	47
ตารางที่ 5.1 ตารางเปรียบเทียบปริมาณเศษกระจกและจำนวนงานล่าช้าระหว่างฮิวริสติกและการจัดงานที่มีกำหนดส่งมอบงานเร็วสุดก่อน	49
ตารางที่ 5.2 ตารางผลการเปรียบเทียบด้านเวลาและด้านคุณภาพของคำตอบระหว่างฮิวริสติกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	51
ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงเวลาในการคำนวณและจำนวนงานที่ส่งสายของกระจกแผ่นใหญ่	55
ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงเวลาในการคำนวณและจำนวนงานที่ส่งสายกระจกแผ่นเล็ก	55
ตารางที่ 5.5 ตารางเปรียบเทียบจำนวนงานที่ส่งสายระหว่างกรณีกระจกชิ้นใหญ่และกระจกชิ้นเล็ก.....	57
ตารางที่ 5.6 ตารางผลลัพธ์การวิเคราะห์ความไวของค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทัน	58

บทที่ 1

บทนำ

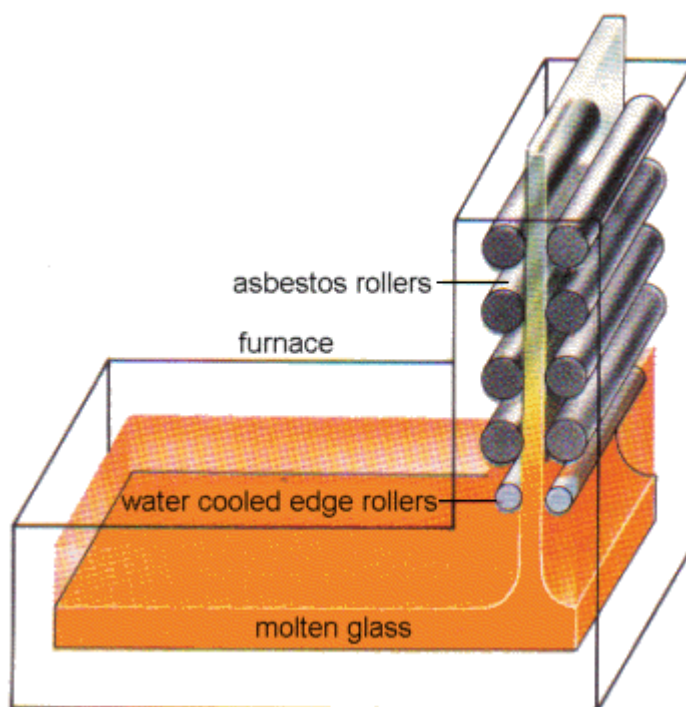
1.1 ที่มาและความสำคัญของกระจกแผ่นเรียบ

กระจกแผ่นเรียบ (Float Glass) เป็นปัจจัยการผลิตที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรมที่ใช้กระจกแผ่นและกระจกแปรรูปเป็นวัตถุดิบ เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ และอุตสาหกรรมรถยนต์ นอกจากนี้กระจกยังเป็นวัสดุที่ใช้ตกแต่งทั่วไปเพื่อเพิ่มความสวยงามและความสว่างไสวให้กับอาคารบ้านเรือนที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกระจกกว่า 80% สามารถหาได้จากแหล่งผลิตในประเทศ (มหาวิทยาลัยมหิดล, 2002) เช่น ทรายแก้ว หินฟืนม้า หินโดโลไมต์ ในขณะที่โซดาแอช ผงคาร์บอน ผงเหล็ก และโซเดียมซัลเฟต เป็นวัตถุดิบที่จำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ

ในช่วงปี พ.ศ. 2506 ประเทศไทยต้องนำเข้ากระจกจากยุโรป โดยนิยมนำเข้าจากประเทศฝรั่งเศส ต่อมาประเทศไทยสามารถทำการผลิตกระจกแผ่นเรียบขึ้นได้เองเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2507 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดแทนการนำเข้า ในช่วงแรกมีผู้ผลิตกระจกเพียงรายเดียว คือ บริษัท กระจกไทย-อาซาฮี จำกัด ซึ่งเกิดจากการร่วมทุนระหว่าง บริษัท กระจกไทย จำกัด และบริษัท อาซาฮีกลาส จำกัด ประเทศญี่ปุ่น ต่อมาเมื่อเศรษฐกิจของประเทศไทยมีการเจริญเติบโตมากขึ้น จึงมีความต้องการใช้กระจกเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้มีผู้ผลิตรายใหม่เข้าสู่ตลาด และบริษัทผู้ผลิตต่างก็มีการขยายกำลังการผลิตให้เพียงพอต่อความต้องการที่สูงขึ้น (पालวงส์, 2005)

กระจกที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ในปัจจุบันล้วนใช้กระจกแผ่นเรียบหรือกระจกพื้นฐานเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต เป็นเหตุผลให้อุตสาหกรรมการผลิตกระจกแผ่นเรียบมีความสำคัญ และส่งผลต่ออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง ปัจจุบันกระจกแผ่นเรียบสามารถผลิตได้ 2 รูปแบบ โดยวิธีแรกเรียกว่า การผลิตแบบฟูโคต์ (Fourcault process) ในรูปที่ 1-1 เป็นกระบวนการผลิตแบบเก่าซึ่งขึ้นรูปกระจกด้วยการดึงกระจกขึ้นตามแนวตั้งโดยใช้ตัวนำ หรือแม่พิมพ์ที่ถูกหย่อนลงไปใต้น้ำแก้ว เพื่อให้หน้าแก้วเกาะตัวนำแล้วจึงดึงขึ้นมาเพื่อลดอุณหภูมิลงจนได้เป็นกระจกแผ่น ตัวกระจกที่ได้จากวิธีการผลิตดังกล่าวมีข้อเสียที่สำคัญ คือ ผิวกระจกมีลักษณะเป็นคลื่น ไม่ราบเรียบ เมื่อขนาดของแผ่น

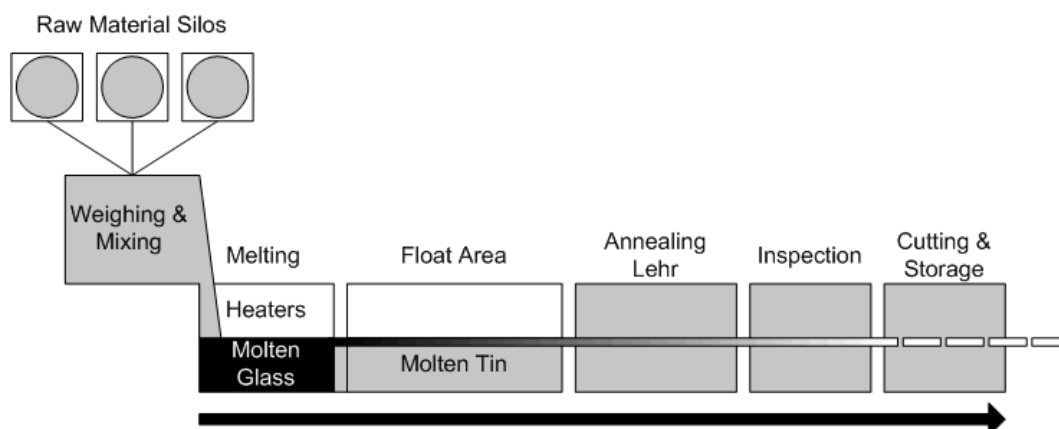
กระจกใหญ่ขึ้นจะยิ่งทำให้เกิดจุดบกพร่องมากขึ้น กระจกแผ่นเรียบที่ผลิตด้วยวิธีการนี้นิยมนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ 3 ประเภทหลัก ได้แก่ กระจกใส กระจกลวดลาย และกระจกฝ้า



รูปที่ 1-1 กระบวนการผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบฟูโกต์

(Source : The Illustrated Science and Invention Encyclopedia New York)

วิธีการผลิตกระจกอีกวิธีหนึ่งเรียกว่า การผลิตกระจกแบบโฟลท (Float glass process) ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตที่มีลักษณะต่อเนื่อง ดังแสดงใน รูปที่ 1-2 วิธีการนี้ได้รับการพัฒนามาจากการผลิตกระจกแบบฟูโกต์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการปล่อยให้น้ำแก้วไหลไปบนอ่างดีบุกเหลวแล้วทำการดึงขึ้นรูปในแนวราบทั้งนี้ ปริมาณน้ำแก้วที่ปล่อยออกมาและความเร็วในการดึงขึ้นรูปจะทำให้ความหนาบางของกระจกแตกต่างกัน วิธีการผลิตนี้จะทำให้กระจกที่ได้มีผิวราบเรียบและมีความสม่ำเสมอตลอดแผ่น สามารถควบคุมคุณภาพและมาตรฐานของการผลิตได้ดี และไม่จำเป็นต้องหยุดไลน์การผลิตเพื่อดึงตัวนำเหมือนวิธีการผลิตกระจกแบบฟูโกต์ (เนตรปฐมพร, 2008) กระจกที่ผลิตด้วยวิธีการนี้เหมาะที่จะนำไปใช้ในงานที่ต้องการความประณีตสวยงาม แต่มีข้อเสียด้านต้นทุนที่สูงกว่าการผลิตแบบฟูโกต์มาก



รูปที่ 1-2 กระบวนการผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบโฟลท

ในส่วนของการผลิตกระจกที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ จะเป็นการนำกระจกโฟลทหรือกระจกแผ่นเรียบมาแปรรูป ซึ่งมีความหลากหลายทั้งชนิด และกระบวนการผลิตเพื่อประโยชน์ใช้สอยตามคุณสมบัติและลักษณะงานที่แตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งประเภทของกระจกออกได้เป็น 7 ประเภทหลัก (ยิ้มแย้ม, 2010) ดังนี้

1. กระจกเงา (Mirror glass) เป็นกระจกที่ได้จากการฉาบโลหะเงินลงไปทางด้านใดด้านหนึ่งของกระจกโฟลทชนิดใสหรือกระจกโฟลทสีตัดแสง แล้วนำมาเคลือบด้วยสารโลหะทองแดงเพื่อป้องกันโลหะเงิน และเพื่อเพิ่มความทนทานในการใช้งาน

2. กระจกสะท้อนแสง (Heat reflection glass) เป็นกระจกที่ได้จากการนำกระจกโฟลทชนิดใสมาเคลือบด้วยออกไซด์ของโลหะ ขนาดความหนาของการเคลือบขึ้นอยู่กับระดับความเข้มของแสงที่ส่องผ่าน กระจกสะท้อนแสงมีคุณสมบัติด้านการสะท้อนแสง เมื่อมองจากภายนอกจะคล้ายกระจกเงา แต่หากมองจากภายในจะคล้ายกระจกสีตัดแสง

3. กระจกนิรภัยเทมเปอร์ (Architectural flat tempered safety glass) เป็นกระจกที่ได้จากการนำกระจกโฟลทมาเผาที่อุณหภูมิ 650 ถึง 700 องศาเซลเซียส แล้วใช้ลมเป่าเพื่อให้กระจกเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ผิวของกระจกจะอยู่ในสภาพแรงอัด ขณะที่ภายในของกระจกอยู่ในสภาวะแรงดึง กระจกประเภทนี้มีความแข็งแรงกว่ากระจกธรรมดา เมื่อกระจกถูกกระแทกหรือทุบจนแตก แผ่นกระจกจะแตกละเอียดเป็นเม็ดเล็กที่ไม่มีคม กระจกชนิดนี้จึงนิยมนำไปใช้งานกับยานพาหนะ

4. กระจกนิรภัยหลายชั้น (Architectural flat laminated safe glass) เป็นกระจกที่เพิ่มความปลอดภัยให้แก่ผู้ใช้มากขึ้น โดยกระจกนิรภัยหลายชั้นนี้มีคุณสมบัติในการป้องกันการโจรกรรม

เนื่องจากยากแก่การเจาะผ่าน และเมื่อเกิดการกระทบหรือชนอย่างรุนแรง ชั้นส่วนที่แตกจะไม่หลุดออกจากกัน เพียงแต่มีรอยร้าวเกิดขึ้นเท่านั้น

5. กระจกฉนวน (Sealed insulating glass) เป็นการนำกระจก 2 แผ่นขึ้นไปวางขนานกันให้มีระยะห่างพอสมควร แล้วทำการฉีตสารเคมีที่บริเวณขอบกระจกทุกด้านทำให้กระจกคงรูปป้องกันอากาศชื้นจากภายนอกที่จะเข้ามาภายในช่องว่างระหว่างแผ่นกระจก กระจกฉนวนมีคุณสมบัติพิเศษ คือ สามารถลดปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านกระจก และลดระดับเสียงที่ผ่านผนังอาคารลงได้ กระจกประเภทนี้เหมาะสำหรับการใช้งานในห้องสมุด พิพิธภัณฑ์ และห้องคอมพิวเตอร์

6. กระจกเสริมลวด (Wired glass) เป็นกระจกที่มีเส้นลวดแดงตาข่ายฝังอยู่ภายใน จัดเป็นกระจกนิรภัยชนิดหนึ่ง เมื่อแตก เส้นลวดจะช่วยยึดเศษกระจกไม่ให้หลุดลงมา

7. กระจกกันกระสุน (Bulletproof glass) เป็นกระจกที่ผลิตโดยการนำกระจกนิรภัยชนิดพิเศษมาติดกับกระจกนิรภัยหลายชั้น โดยมีแผ่นพิมพ์พลาสติกจำพวกโพลีคาร์บอเนตคั่นกลาง

เนื่องด้วยเหตุผลทางการผลิต เช่น คุณลักษณะและคุณภาพของกระจกที่ผลิตได้ การผลิตที่มีความต่อเนื่อง ผู้ผลิตกระจกแผ่นเรียบในอุตสาหกรรมกระจกในปัจจุบันจึงนิยมเลือกใช้วิธีการผลิตกระจกแบบโฟลทเป็นหลัก

1.2 กระบวนการผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบโฟลท

การผลิตกระจกแบบโฟลทเป็นการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous process) ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการหลัก 4 ขั้นตอนหลัก คือ การหลอม การดึงขึ้นรูป การอบ การตัดและตรวจสอบ

กรรมวิธีการผลิตกระจกเริ่มจากการนำเอาวัตถุดิบ ได้แก่ ทรายแก้ว หินฟันม้า หินโดโลไมต์ เศษกระจก โซดาแอช หินปูน และโซเดียมซัลเฟตมาผสมเข้าด้วยกันตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ จากนั้นจึงนำส่วนผสมดังกล่าวไปใส่ในเตาหลอม (Melter) วัตถุดิบเหล่านี้จะถูกหลอมรวมให้เป็นน้ำแก้วที่อุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะมีการปรับอุณหภูมิของน้ำแก้วลงให้เหลือประมาณ 1,100 องศาเซลเซียส เพื่อให้แก้วมีความหนืดพอเหมาะในการขึ้นรูปกระจก น้ำแก้วจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการที่ทำให้เป็นแผ่นด้วยวิธีการปล่อยให้ไหลลงสู่อ่างดีบุก (Tin bath) แล้วจึงทำการดึงขึ้นรูปน้ำแก้วที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำดีบุกเหลวจะลอยตัวขึ้นอยู่บนผิวดีบุกเหลวโดยมีเครื่องเอ็ดจอร์ล

(Edge-roll) ทำหน้าที่ในการดึงขึ้นรูปให้ได้ความหนาและความกว้างตามต้องการ ทั้งนี้ความหนาและความกว้างของกระจกจะถูกกำหนดด้วยตำแหน่งและความเร็วในการดึง และแผ่นกระจกในแต่ละสแนปจะสามารถผลิตได้กว้างสูงสุดเท่ากับความกว้างสูงสุดของริบบอน (Maximum Ribbon Width) โดยแผ่นกระจกที่ออกจากอ่างตีบุกจะเป็นแผ่นยาวต่อเนื่องและมีความร้อนประมาณ 800 องศาเซลเซียส เนื่องจากกระจกดังกล่าวมีความเครียด (Strain) สูง จึงมีความแข็งต่ำทำให้จำเป็นต้องนำไปผ่านกระบวนการอบ (Annealing) ให้เกิดการเย็นตัวอย่างช้าๆ จนอุณหภูมิเหลือประมาณ 40 องศาเซลเซียส หรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมภายนอกเพื่อไม่ให้เกิดการร้าวหรือแตก จากนั้นแผ่นกระจกที่ได้จะถูกล้างและตรวจสอบด้วยแสงเพื่อหาจุดบกพร่อง เช่น รอยร้าว รอยแตก รอยบิ่น ค่าความใส ก่อนจะถูกลำเลียงผ่านโรลเลอร์ (Roller) เข้าสู่กระบวนการตัดต่อไป

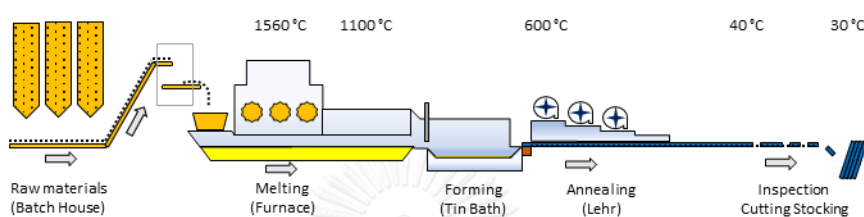
ในการตัดกระจกนั้นจะดำเนินการโดยการใช้เครื่องกรีด (Cutter) ที่ถูกควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ เครื่องกรีดจะทำการกรีดในสองแนว คือ แนวตามการไหล (Lengthwise) และแนวขวางการไหล (Crosswise) ทำให้บนกระจกเกิดรอยกรีดและถูกแยกออกจากกันเมื่อผ่านชุดหักกระจก (Roller snap) ดังแสดงใน รูปที่ 1-3



รูปที่ 1-3 ชุดหักกระจก

(Source : <https://www.alibaba.com>)

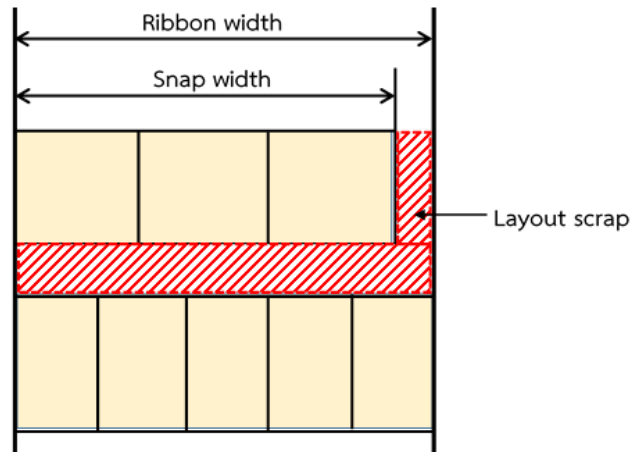
ชุดหักกระจกจะทำการหักกระจกตามรอยที่กรีดไว้โดยเครื่องกรีดและหักตามรอยขอบจับของเอตจโรล เพื่อให้ได้กระจกตามขนาดที่ต้องการ กระจกที่ถูกตัดแล้วจะถูกโรลเลอร์ลำเลียงไปจัดเก็บ ส่วนเศษกระจกหรือกระจกที่ไม่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพจะถูกลำเลียงกลับไปเป็นเศษกระจกเพื่อนำกลับไปหลอมขึ้นรูปใหม่อีกครั้ง ในการผลิตกระจกแผ่นเรียบด้วยวิธีการผลิตแบบโฟลทนั้นสามารถอธิบายได้ด้วย รูปที่ 1-4



รูปที่ 1-4 กระบวนการผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบโฟลท

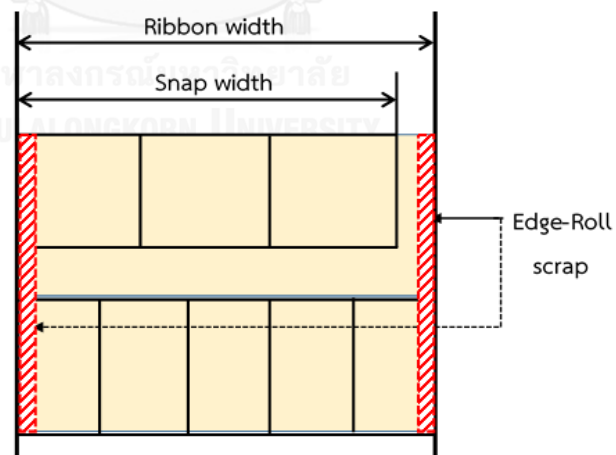
จากกระบวนการผลิตกระจกแบบโฟลทที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น จะมีความสูญเสียหลักเกิดขึ้น 2 ประการ คือ

1. เศษกระจกส่วนเกิน (Scrap) ในการขึ้นรูปและตัดกระจก ซึ่งเกิดจาก 5 สาเหตุหลักดังนี้
 - เศษกระจกที่เกิดจากการจัดวางรูปแบบการตัด (Layout Scrap) เศษกระจกประเภทนี้เกิดจากกระจกที่ต้องการมีความกว้าง หรือความยาว ไม่พอดีกับตัวกระจกที่ทำการตั้งขึ้นรูปทำให้ตัดแล้วเหลือส่วนเกินออกมา เศษกระจกส่วนนี้มักเกิดจากการวางแผนการจัดวางรูปแบบการตัดที่ไม่เหมาะสม แสดงใน รูปที่ 1-5



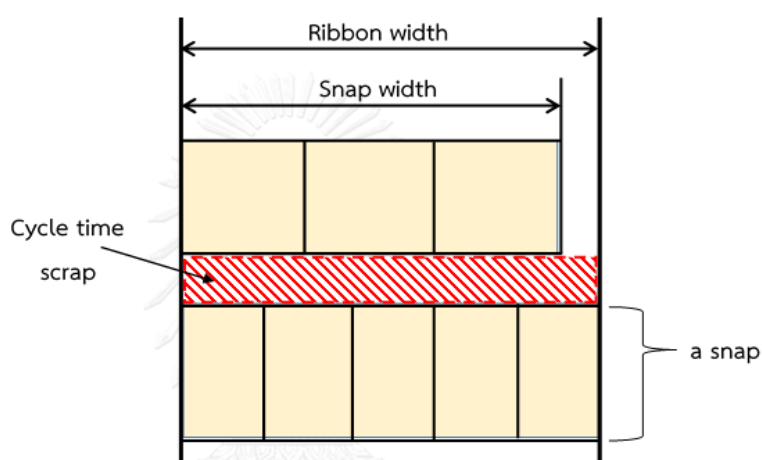
รูปที่ 1-5 รูปแบบของเศษกระจกที่เกิดจากการจัดวางรูปแบบการตัด

- เศษกระจกที่เกิดจากขอบการจับของเอ็ดจ์โรล (Edge-Roll Scrap) คือ เศษกระจกที่เกิดจากรอยหนีบของโรลเลอร์ในขณะที่ดึงขึ้นรูปในอ่างดีบุกซึ่งเป็นเศษกระจกที่ไม่สามารถทำให้หายไปได้ แต่สามารถทำให้น้อยลงได้ด้วยการวางแผนการผลิตให้เหมาะสม แสดงใน รูปที่ 1-6



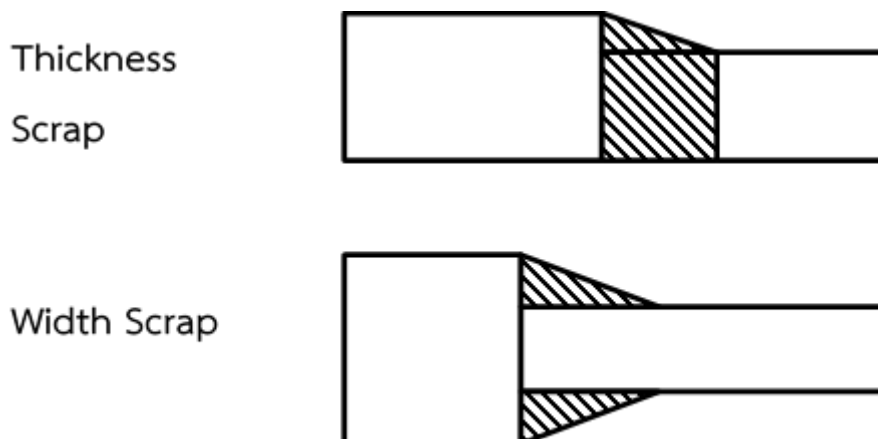
รูปที่ 1-6 รูปแบบของเศษกระจกที่เกิดจากขอบการจับของเอ็ดจ์โรล

- เศษกระจกที่เกิดจากการเก็บไม่ทัน (Cycle Time Scrap) จาก รูปที่ 1-7 เนื่องจากกระจกเป็นวัสดุที่แตกหักได้ง่าย จึงต้องการการดูแลเรื่องการจัดเก็บและการขนย้ายเป็นพิเศษ ทำให้การเก็บทำได้ล่าช้า ทั้งนี้กระจกที่ถูกลำเลียงด้วยสายพานออกมาอย่างต่อเนื่อง อาจมีปริมาณมากส่งผลทำให้เกิดเหตุการณ์ที่จัดเก็บกระจกไม่ทัน เศษกระจกที่ไม่สมบูรณ์จะถูกรอเลอรรนำกลับไปทำเป็นเศษกระจกแล้วนำมาหลอมรวมใหม่



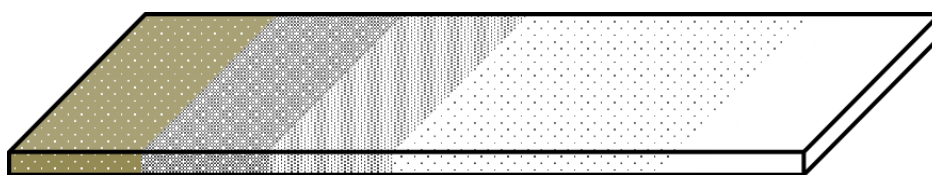
รูปที่ 1-7 รูปแบบของเศษกระจกที่เกิดจากการเก็บไม่ทัน

- เศษกระจกที่เกิดจากการเปลี่ยนขนาด (Sizing Scrap) คือ เศษกระจกที่เกิดขึ้นขณะทำการเปลี่ยนขนาดของสินค้าที่ทำการผลิตภายในอ่างดีบุก ซึ่งการเปลี่ยนขนาดจะก่อให้เกิดช่วงของกระจกที่ไม่ได้ขนาด ไม่ว่าจะมีความหนา หรือความกว้าง ช่วงของกระจกที่ไม่ได้ขนาดจะไม่สามารถนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ได้ หากแต่ต้องนำกลับไปทำการหลอมรวมใหม่ โดยการเปลี่ยนความหนาจะทำให้เกิดเศษกระจกมากกว่าการเปลี่ยนความกว้าง โดยเศษกระจกที่เกิดจากการเปลี่ยนขนาดถูกแสดงดังใน รูปที่ 1-8



รูปที่ 1-8 รูปแบบของเศษกระจกที่เกิดจากการเปลี่ยนขนาด

- เศษกระจกที่เกิดจากการเปลี่ยนสี คือ เศษกระจกที่เกิดจากการเปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์ แสดงใน รูปที่ 1-9 โดยจะมีการเปลี่ยนส่วนผสมก่อนนำเข้าเตาหลอม กระจกที่ผลิตได้ระหว่างการเปลี่ยนสี จะเกิดช่วงของกระจกที่มีสีไม่สมบูรณ์ ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ โดยปกติแล้วผู้ผลิตจะไม่ทำการสลับสีของกระจกระหว่างการผลิตเนื่องจากการเปลี่ยนสีของกระจกก่อให้เกิดความสูญเสียสูง



รูปที่ 1-9 รูปแบบของเศษกระจกที่เกิดจากการเปลี่ยนสี

2. เวลาปรับตั้งเมื่อทำการเปลี่ยนขนาดของแผ่นกระจกในอ่างตีบุก (Setup time) ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนขนาดของกระจก ไม่ว่าจะเป็นความกว้าง หรือความหนา ทำให้เกิดช่วงที่ผลิตกระจกไม่ได้ขนาด เช่น ความกว้างไม่ได้ขนาด หรือความหนาไม่ได้ขนาด กระจกในช่วงเวลานี้ไม่สามารถนำไปส่งมอบให้ลูกค้าได้ หากแต่ต้องนำกลับไปผ่านกระบวนการหลอมใหม่ในอัตราส่วนที่ทางผู้ผลิตได้กำหนด

ไว้ เวลาปรับตั้งดังกล่าวยังส่งผลกระทบต่อกำหนดส่งมอบ (Due date) และค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการเดินเครื่องจักร ทั้งนี้เวลาปรับตั้งยังเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ควรนำมาพิจารณาประกอบการวางแผนการผลิตด้วย

ความสูญเสีย (Loss) จากการผลิตข้างต้นส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการวางแผนรูปแบบการจัดวาง (Layout) และการวางแผนการผลิตที่ไม่เหมาะสม ส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตสูง และอาจก่อให้เกิดปัญหาผลิตสินค้าไม่ทันตามความต้องการแม้กำลังการผลิตของบริษัทผู้ผลิตมีเพียงพอต่อความต้องการดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาแนวคิดการวางแผนการผลิตสำหรับอุตสาหกรรมผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบโพลท เพื่อลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตกระจก ซึ่งผู้ประกอบการสามารถนำไปใช้วางแผนการผลิตภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ ได้

เนื่องด้วยเอกลักษณ์ของปัญหาการผลิตกระจกแผ่นเรียบที่มีลำดับก่อนหลังในการผลิตที่ชัดเจน อีกทั้งยังมีเวลาปรับตั้งและความสูญเสียจากการเปลี่ยนลำดับการผลิตในแต่ละคำสั่งซื้อ ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับลักษณะทั่วไปของปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling salesman problems) โดยคำตอบที่ได้จากการแก้ปัญหา TSP สามารถนำกลับมาแสดงเป็นลำดับการผลิตที่มีค่าความสูญเสียรวมน้อยที่สุดได้ นอกจากนี้การแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายยังสามารถดำเนินการได้ด้วยฮิวริสติกที่มีการค้นคว้าและพัฒนากันอย่างแพร่หลาย (Arnesen et al., 2017) เพื่อให้ได้มาซึ่งคำตอบที่มีคุณภาพ ด้วยเหตุดังกล่าวผู้วิจัยจึงเลือกที่จะประยุกต์ใช้วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวในปัญหาการวางแผนการผลิตกระจกโพลทนี้

1.3 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและพัฒนาวิธีการวางแผนการผลิตในอุตสาหกรรมผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบโฟลท (Float glass) เพื่อลดความสูญเสียตลอดจนเพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบโฟลทในโรงงานอุตสาหกรรมในเวลาที่จำกัด โดยใช้ฮิวริสติกที่อ้างอิงจากปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling Salesman Problem)

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. วางแผนและพัฒนาแผนการผลิตภายใต้ระบบการทำงานของโรงงานกระจกแผ่นเรียบแบบโฟลทเท่านั้น
2. งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนากระบวนการวางแผนการผลิตในส่วนของการตั้งขึ้นรูปและการตัด ซึ่งประกอบไปด้วย การวางแผนรูปแบบการจัดวาง (Layout) และลำดับในการผลิต (Sequence) เท่านั้น
3. ความสูญเสียที่เกิดขึ้นจะพิจารณาเฉพาะความสูญเสียที่เป็นเศษกระจกที่เกิดขึ้นจากการตัดและการเปลี่ยนขนาดของกระจกเท่านั้น

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

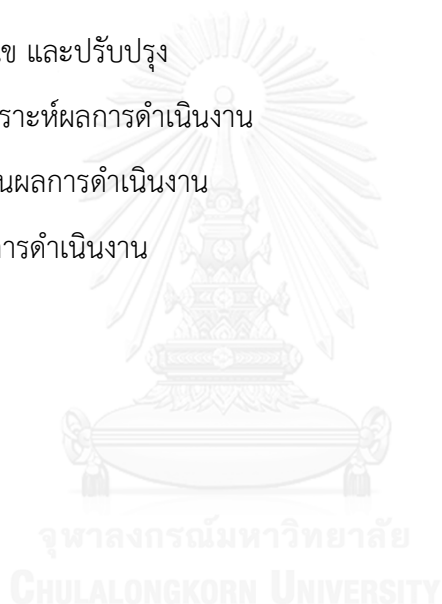
ฮิวริสติกสำหรับการจัดลำดับการผลิต สำหรับอุตสาหกรรมผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบโฟลท เพื่อลดความสูญเสียที่เกิดในกระบวนการผลิตลงอย่างมีประสิทธิภาพ

1.6 แนวทางการหาคำตอบ

งานวิจัยฉบับนี้ มุ่งเน้นการสร้างฮิวริสติกเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการวางแผนการผลิตกระจกแบบโฟลทในมุมมองของปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (TSP) ภายใต้กรอบเวลาการทำงานที่จำกัด (Time Window) โดยที่ลำดับของอันดับการผลิตส่งผลให้เกิดผลลัพธ์ที่ต่างกัน (Asymmetric) เพื่อลดปริมาณของเสีย (Waste) และเพิ่มประสิทธิภาพ (Efficiency) ของการผลิตกระจกให้สูงขึ้น

1.7 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาข้อมูลกระบวนการผลิตกระจกแผ่นเรียบ และอุตสาหกรรมผลิตกระจกแผ่นเรียบ
2. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนการผลิตและ การวางแผนแก้ปัญหาการเดินทาง
3. ศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลและปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบการวางแผนการผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบโฟลทในปัจจุบัน
4. นำเสนอแนวคิดงานวิจัย
5. ออกแบบระบบการพัฒนาการวางแผนการผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบโฟลท
6. ทดสอบ แก้ไข และปรับปรุง
7. สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน
8. จัดทำรายงานผลการดำเนินงาน
9. นำเสนอผลการดำเนินงาน



บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรม

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling salesman problems) เป็นหนึ่งในปัญหาที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยในการพัฒนาวิธีการในการหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพ โดยให้เวลาในการคำนวณที่รวดเร็ว วัตถุประสงค์หลักของการแก้ปัญหา TSP คือการหาลำดับของเส้นทางที่ดีที่สุดในการเดินทางไปยังเมืองทุกเมืองภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ ให้มีต้นทุนต่ำที่สุดทั้งนี้พนักงานขายสามารถเดินทางไปยังเมืองต่างๆ ได้เพียงครั้งเดียว และต้องเดินทางกลับมายังเมืองเริ่มต้น ในวรรณกรรมเราสามารถเรียกเมืองต่างๆว่า Node ในขณะที่เส้นทางหรือระยะทางที่ถูกเลือกใช้จะเรียกว่า Arc ทั้งนี้คุณลักษณะพิเศษของปัญหาการเดินทางของพนักงานขายที่ผู้วิจัยให้ความสนใจได้แก่

1. ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายที่ไม่มีคุณสมบัติสมมาตร (Asymmetric) ระหว่าง Node กล่าวคือ ระยะทางหรือค่าเดินทางที่ใช้ระหว่าง Node A ไปยัง Node B มีค่าไม่เท่ากับระยะทางหรือค่าเดินทางที่ใช้ จาก Node B ไปยัง Node A
2. ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายที่มีข้อจำกัดในเรื่องระยะเวลาการทำงาน (Time Windows) หรือ เวลากำหนดส่งสินค้า

การผลิตกระจกแบบโพลทในงานวิจัยฉบับนี้มีลักษณะเป็นปัญหาการวางแผนการผลิต (Production Problem) ที่มีคำสั่งซื้อ กำหนดส่งมอบ และเวลาปรับตั้ง ซึ่งคล้ายคลึงกับปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย โดยในงานวิจัยฉบับนี้จะนำ Asymmetric Traveling Salesman Problem with Time Windows (ATSPTW) มาประยุกต์ใช้เพื่อหาคำตอบของปัญหาการผลิตกระจกแผ่นเรียบ โดยกำหนดให้ node แทนคำสั่งซื้อของลูกค้า ที่ประกอบไปด้วยข้อมูลขนาดของกระจก จำนวนแผ่นของกระจก และกำหนดส่งสินค้า ในขณะที่ Arc สามารถเปรียบได้กับค่าเดินทาง หรือความสูญเสียจากการเปลี่ยนคำสั่งซื้อ เมื่อเราทำการต่อ Arc ทั้งหมดจะทำให้ได้คำตอบ (Tour) ของปัญหา ซึ่งในงานวิจัยนี้เส้นทางที่ได้จะแสดงถึงลำดับการผลิตของคำสั่งซื้อที่มีค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตต่ำที่สุด

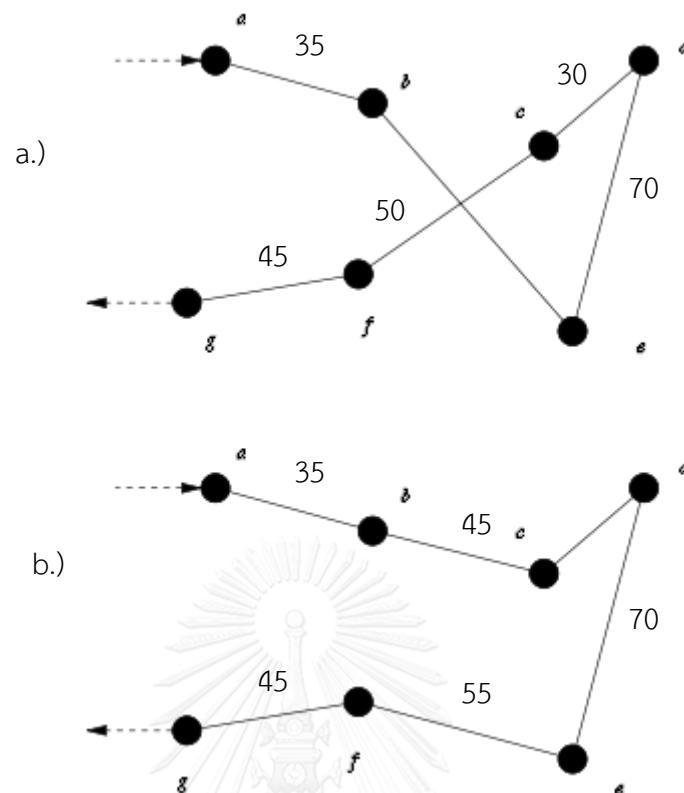
ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย เป็นหนึ่งในปัญหา NP-complete (Karp, 1972) ซึ่งเมื่อขนาดของปัญหาขยายใหญ่ขึ้น เวลาที่ใช้ในการแก้ปัญหาจะไม่ได้เพิ่มขึ้นในลักษณะเส้นตรง ทำให้เราไม่สามารถหาคำตอบของปัญหาที่มีขนาดใหญ่ ในเวลาที่จำกัดได้ ส่งผลให้นักวิจัยต่างคิดค้นพัฒนาฮิวริสติกต่างๆ ขึ้น เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าวแทน

การนำฮิวริสติกพื้นฐานมาใช้ในการหาคำตอบของปัญหา NP-complete นั้น (Ruiz-Vanoye et al., 2011) อาจไม่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด แต่ก็ง่ายต่อการนำไปใช้แก้ปัญหาในชีวิตจริง ทั้งนี้วิธีการหาคำตอบโดยทั่วไปมักถูกแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. การหาคำตอบแรกเริ่ม (Initial Solution Construction) ฮิวริสติกพื้นฐานที่นิยมนำมาใช้เพื่อหาคำตอบเบื้องต้น (Tour) ของปัญหาปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย ได้แก่
 - Nearest Neighborhood Search
 - Greedy Algorithm (Solomon, 1994)
 - Insertion Heuristic (Gendreau et al., 1992)
2. การพัฒนาคำตอบ (Tour Improvement) โดยการ Search แบบต่างๆ เช่น 2-opt, 3-opt ,K-opt ,Lin-Kernighan (Keld, 2000) เพื่อให้เกิดคำตอบที่ดีขึ้น โดย Search Algorithm ที่เลือกใช้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของปัญหา

อีกหนึ่งฮิวริสติกที่เป็นที่นิยมและได้รับความนิยมในการแก้ปัญหา TSP คือ λ - exchange heuristics (Rohan, 2011) ซึ่งเป็นเทคนิคการพัฒนาคำตอบที่มีประสิทธิภาพและได้รับการยอมรับในการแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย โดยเฉพาะ 2-opt และ 3-opt ได้ถูกพิสูจน์ว่าเป็นวิธีแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพทั้งด้านเวลาในการคำนวณ และคุณภาพของคำตอบ (Dumas et al., 1995)

การทำงานของ 2-opt และ 3-opt มีหลักการเหมือนกัน คือ การเลือกสลับลำดับ arc ใดๆที่เมื่อทำงานสลับแล้วทำให้คำตอบที่ได้มีการพัฒนาเกิดขึ้น โดย 2-opt สลับครั้งละ 2 arc ในขณะที่ 3-opt จะทำการสลับทีละ 3 arc



รูปที่ 2-1 ตัวอย่างการทำงานของ 2-opt Algorithm

จากรูปที่ 2-1 การเดินทางจากเริ่มจาก $a - b - e - d - c - f - g$ ระยะทางที่ต้องเดินทางทั้งหมดเท่ากับ 270 กิโลเมตร โดยระยะจาก b ไป e เท่ากับ 70 กิโลเมตร และ c ไป f เท่ากับ 50 กิโลเมตร เมื่อการสลับให้เส้นทางการเดินทางเปลี่ยนเป็น $a - b - c - d - e - f - g$ ทำให้ระยะทางที่ต้องเดินทางทั้งหมดลดลงเหลือเท่ากับ 250 ในกรณีนี้จะเป็นกรณีที่มีการสลับเส้นทางทำให้คำตอบเกิดการพัฒนาส่งผลให้ได้เส้นทางการเดินทางใหม่ขึ้น และสามารถวนซ้ำไปจนครบทุกเส้นทางการเดินทางเพื่อหาคำตอบที่ดีกว่าเดิมได้

จากการศึกษาของ Johnson and McGeoch (1995) พบว่า Search Algorithm จำพวก 2-opt , 3-opt และ k-opt เหมาะสมกับการแก้ปัญหาขนาดเล็กและต้องการความเร็วในการหาคำตอบ โดยหลักการของวิธีการดังกล่าวอยู่ที่การสลับ Arc ของเส้นทางที่เกิดขึ้น หากผลลัพธ์ที่ได้มีการพัฒนาจะทำการเปลี่ยนเส้นทางดังกล่าว แต่หากไม่พัฒนาจะกลับไปใช้เส้นทางเดิม แล้วจึงดำเนินการค้นหาต่อไป

Variable Neighborhood Search (Hansen and Mladenovic, 2001) เป็น Search Algorithm อีกกลุ่มหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้น เหมาะสำหรับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ VNS มีแนวคิดในการพัฒนาคำตอบให้ดีขึ้นโดยพยายามที่จะออกจากช่วงคำตอบที่มีอยู่ในปัจจุบันเพื่อหาคำตอบใหม่ในช่วงอื่น ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนในการพัฒนาคำตอบ 4 ขั้นตอน คือ

1. การกำหนดกรอบการค้นหา (Neighborhood Domain)
2. การสั่นเพื่อเลือกคำตอบที่จะทำการพัฒนา (Shaking)
3. การหาคำตอบในช่วงใกล้เคียง (Local search) โดยใช้ Neighborhood Search Method
4. เปรียบเทียบผลที่ได้ ระหว่างคำตอบเดิมและคำตอบใหม่ หากคำตอบที่ได้มีการพัฒนาให้เลือกคำตอบใหม่ที่ได้ แล้วทำการค้นหาโดยใช้ Neighborhood เดิม หากคำตอบที่ได้ไม่ได้ดีขึ้นให้เพิ่มลำดับ Neighborhood ขึ้นแล้ววนซ้ำจากตอนที่ 2 จนได้ลำดับของ Neighborhood เท่ากับกรอบการค้นหาที่กำหนดไว้จึงหยุดการค้นหา

Ascheuer et al. (2001) ได้นำหลักการ Branch & Cut มาใช้ในการแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายที่มีกรอบเวลาโดยอ้างอิงจากกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming) ทั้งนี้ Branch & Cut มีหลักการดำเนินงาน คือ หาคำตอบของ Linear Programming Relaxation (Branch) ก่อน จากนั้นจึงสร้างข้อจำกัด (Constraint) พิเศษที่มีลักษณะเป็นระนาบขึ้นมาเพื่อให้การหาคำตอบอยู่ในพื้นที่ค้นหา (Search Space) ที่เหมาะสม

การจัดงานที่มีกำหนดส่งมอบงานเร็วสุดก่อน (Earliest Due Date) โดย J.K. (1977) เป็นหลักการที่นิยมใช้วางแผนการผลิตในอุตสาหกรรมทั่วไป โดยหลักการทำงานของฮิวริสติก จะเลือกงานที่มีกำหนดการส่งมอบงานเร็วที่สุดมาเพื่อทำเป็นงานแรก จากนั้นจะเลือกงานที่มีกำหนดการส่งมอบงานเร็วรองลงไปมาทำงานเป็นงานถัดไป ตามลำดับจนครบทุกงาน โดยฮิวริสติกนี้ มีแนวโน้มที่ก่อให้เกิดจำนวนงานที่ทำการส่งมอบสินค้าไม่ทัน ในปริมาณน้อยหรือไม่มีเลย

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อุตสาหกรรมผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบโพลทเป็นอุตสาหกรรมที่มีความเป็นเอกลักษณ์ หากแต่สามารถนำงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนการผลิตกระดาษที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันมา

ศึกษาเพื่อหาแนวทางของการแก้ปัญหาได้ ดังเช่นในงานวิจัยของ (Gilmore and Gomory, 1961) และ (Gilmore and Gomory, 1963) ที่มีการนำเอากำหนดการจำนวนเต็ม (Integer-Programming) เข้ามาใช้แก้ปัญหา Cutting-stock problem (2D-CSP) ซึ่งเป็นการพิจารณาการวางรูปแบบการตัดที่เหมาะสมที่สุดในอุตสาหกรรมกระดาษ

ในการสร้างระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการแก้ปัญหาการจัดวางรูปแบบการตัด Jettanut (1994) ได้นำกำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming) เข้ามาประยุกต์ใช้ในการจัดหน้ากระดาษในอุตสาหกรรมพิมพ์เขียว แทนการตัดสินใจโดยอ้างอิงจากประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ (Expert)

ในอุตสาหกรรมลักษณะเดียวกันกล่าวคืองานวิจัยของ (ศรีปฐมสวัสดิ์, 2543) ได้มีการแก้ปัญหาในลักษณะที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยฉบับนี้ โดยมุ่งเน้นไปที่การแก้ปัญหาการวางแผนการผลิตกระดาษของโรงงานผลิตกระดาษคราฟท์ ผ่านการประยุกต์ใช้ปัญหาการขนส่งสินค้า (Transportation Problem) ที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) เพื่อลดต้นทุนการผลิต โดย (ศรีปฐมสวัสดิ์, 2543) ได้นำเอาวิธีการประมาณการของเกล (Vogel's Approximation Method) มาใช้หาคำตอบเบื้องต้น และเสนอให้ใช้วิธีสเตปิงสโตน (Stepping Stone Method) และวิธีของโมดิ (Modi Method) ในการพัฒนาคำตอบให้มีคุณภาพดีขึ้น ทั้งนี้ปัญหาการจัดหน้ากระดาษนี้ยังเป็นปัญหาที่มีลักษณะใกล้เคียงกับปัญหาการจัดวางรูปแบบกระดาษแผ่นเรียบมากที่สุด

แม้การจัดวางรูปแบบการตัดของกระดาษมีลักษณะใกล้เคียงกับการจัดวางรูปแบบการตัดของกระดาษโฟลท อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมกระดาษแผ่นเรียบแบบโฟลทนั้นมีข้อจำกัดที่เป็นเอกลักษณ์แตกต่างจากการจัดวางรูปแบบการตัดกระดาษหรือสิ่งพิมพ์ทั่วไป คือ ข้อจำกัดด้านเวลาการไหลและการตัดแผ่นกระดาษ กล่าวคือ ต้องมีการพิจารณาการจัดลำดับงานประกอบด้วยจึงจะเหมาะที่จะนำมาใช้งานจริง

นอกจากวิธีการหลากหลายที่ได้กล่าวไปข้างต้น เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการนำหลักการหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimization) และฮิวริสติกเข้ามาพัฒนาการวางแผนการผลิตในอุตสาหกรรมอย่างจริงจัง ในการศึกษาของ Na (2011) และ Na et al. (2013) พิจารณาให้มีความสำคัญในการลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากระบบการตัดและการจัดเก็บแผ่นกระดาษ โดยในงานวิจัยดังกล่าวได้ทำการแบ่งวิธีแก้ปัญหาออกเป็น 2 ระยะ คือ

- ระยะสร้างและจัดวางรูปแบบการตัด (snap construction) โดยทำการพัฒนาอิวิริสติกมาใช้ในการจัดขนาดสแนป และจัดวางรูปแบบการตัดจะยอมให้มีเศษกระจกที่เกิดจากการออกแบบเกิดขึ้นได้ (Layout Scrap)
- ระยะการวางลำดับการผลิตแผ่นกระจก (float glass scheduling problem) โดยทำการจัดตารางงานของเครื่องจักรด้วยการนำวิธีการแก้ปัญหาแบบ Mixed-integer programming (MIP) มาใช้

งานวิจัยของ Na (2011) นั้นมีความใกล้เคียงกับแนวคิดของงานวิจัยฉบับนี้ หากแต่งานวิจัยดังกล่าวได้ให้ความสำคัญกับการจัดรูปแบบการตัด และการลดเศษกระจกที่เกิดจากการเก็บไม่ทัน ภายใต้ข้อจำกัดให้พิจารณาแต่การเปลี่ยนขนาดเฉพาะในความกว้าง ซึ่งต่างจากงานวิจัยฉบับนี้ที่พิจารณาโดยรวมทั้ง การเปลี่ยนความกว้างและความหนา



บทที่ 3

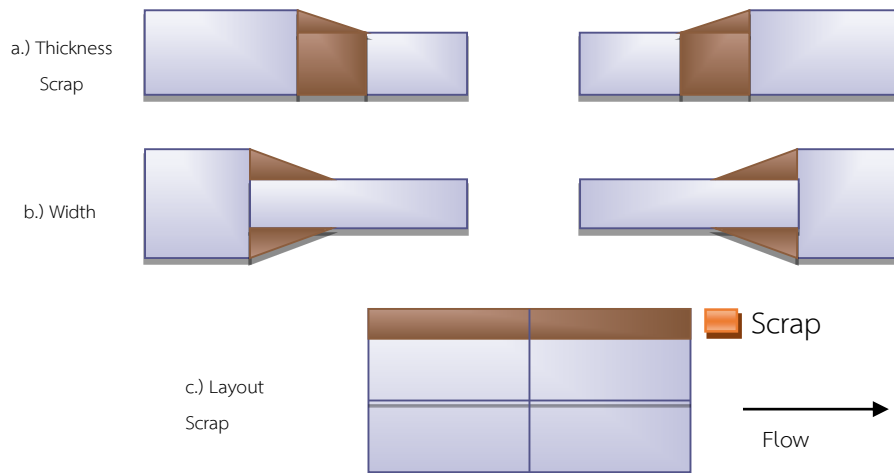
แนวทางการแก้ปัญหา

3.1 ลักษณะของปัญหา

ในกระบวนการผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบโฟลท นั้นมีความสูญเสีย (Loss) เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต 2 ส่วน คือ เศษกระจก (Scrap) และ เวลาปรับตั้ง (Setup time) อันเป็นผลเนื่องจากความหลากหลายของความต้องการของลูกค้า ซึ่งทำให้เสียการปรับเปลี่ยนความกว้าง ความหนา รวมถึงปริมาณในการผลิตไม่ได้ ทั้งนี้หากแผนการผลิตที่ใช้ไม่มีประสิทธิภาพอาจก่อให้เกิดความสูญเสียขึ้นเป็นปริมาณมาก ทำให้เกิดแนวคิดในการนำเอาหลักการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimization) และฮิวริสติก (Heuristic) เข้ามาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการวางแผนการผลิต โดยมุ่งเน้นไปที่การลดความสูญเสียหลัก 2 ประการ

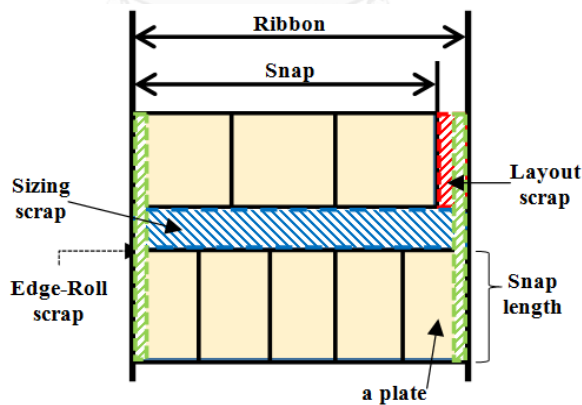
1. เศษกระจกที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปและตัดกระจก ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้พิจารณาเฉพาะเศษกระจก 3 ประเภท ได้แก่

- เศษกระจกที่เกิดจากการเปลี่ยนขนาด (Sizing Scrap) ทั้งที่เกิดจากการเปลี่ยนความกว้าง และการเปลี่ยนความหนาจากค่าหนึ่งไปอีกค่าหนึ่ง ซึ่งจะก่อให้เกิดช่วงของกระจกที่มีขนาดไม่สมบูรณ์และไม่สามารถนำมาไปใช้ ดังแสดงใน รูปที่ 3-1a. และ รูปที่ 3-1b.
- เศษกระจกที่เกิดจากการจัดวางรูปแบบการตัด (Layout Scrap) ซึ่งเกิดจากการจัดวางรูปแบบการตัดที่ไม่พอดีกับความกว้างของกระจกโฟลทที่ทำให้การตั้งขึ้นรูปทำให้เกิดเศษเหลือจากการจัดวางรูปแบบการตัด ตัวอย่างของเศษกระจกประเภทนี้สามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 3-1c



รูปที่ 3-1 รูปแบบของเศษกระจกที่เกิดจากกระบวนการผลิต

- เศษกระจกที่เกิดจากขอบจับของเอดจ์โรล (Edge-Roll Scrap) แสดงใน รูปที่ 3-2 ซึ่งเอดจ์โรลทำหน้าที่เป็นตัวจับขอบกระจกในอ่างดีบุกเพื่อตั้งขึ้นรูป มีขนาดข้างละ 2 นิ้วโดยประมาณ ของเสียส่วนนี้เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้แต่สามารถลดได้ด้วยการวางแผนรูปแบบการผลิตที่เหมาะสม



รูปที่ 3-2 รูปแบบของเศษกระจกต่างๆ ที่สามารถเกิดขึ้นในหนึ่งสแนป

2. เวลาปรับตั้ง (Setup time) ที่เกิดจากการเปลี่ยนความกว้าง และ/หรือ ความหนาของ แผ่นกระจก โดยการปรับเปลี่ยนขนาดจะก่อให้เกิดช่วงเวลาที่แผ่นกระจกไม่สามารถนำไปใช้ เช่น ความความกว้างไม่ได้ขนาด ความหนาไม่ได้ขนาด แผ่นกระจกที่ได้มีความเรียบไม่สม่ำเสมอทั้งแผ่น เวลาปรับตั้งดังกล่าวจะส่งผลถึงเวลาการเริ่มงานต่อไป รวมไปถึงเวลาส่งมอบสินค้า

จาก Tabucanon and Jazmin (1993) ในปัจจุบันวิธีการวางแผนการผลิต อุตสาหกรรม นิยมนำเอาฮิวริสติกพื้นฐานที่มีอยู่ เช่น Shortest Processing time (SPT) หรือ Earliest Due Date (EDD) มาใช้ แต่อุตสาหกรรมกระจกเป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง เตาลอมไม่สามารถ เดินเครื่องใหม่ได้ในทันที เนื่องจากเวลาปรับตั้งและซ่อมบำรุงที่นาน ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องใหม่ที่ สูง ประกอบกับขั้นตอนในการผลิตกระจกที่ซับซ้อน และการเปลี่ยนงาน (ขนาด ปริมาณ สี) ในแต่ละ ครั้งก่อให้เกิดความสูญเสีย (Loss) ฮิวริสติกพื้นฐานจึงอาจไม่เหมาะในการนำมาประยุกต์ใช้ แก้ปัญหา จึงควรมีการพัฒนาฮิวริสติกที่เหมาะสมมาใช้แก้ปัญหาดังกล่าวแทน

จากปัญหาที่ได้แจกแจงไว้ข้างต้นแสดงให้เห็นถึงลักษณะเด่นของกระบวนการผลิตของกระจก แผ่นเรียบแบบโพลท ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำปัจจัยดังกล่าวมาพิจารณาเพื่อหาวิธีการวางแผนการผลิตที่มี ประสิทธิภาพ และสามารถนำไปใช้งานได้จริง

3.2 สมมติฐาน

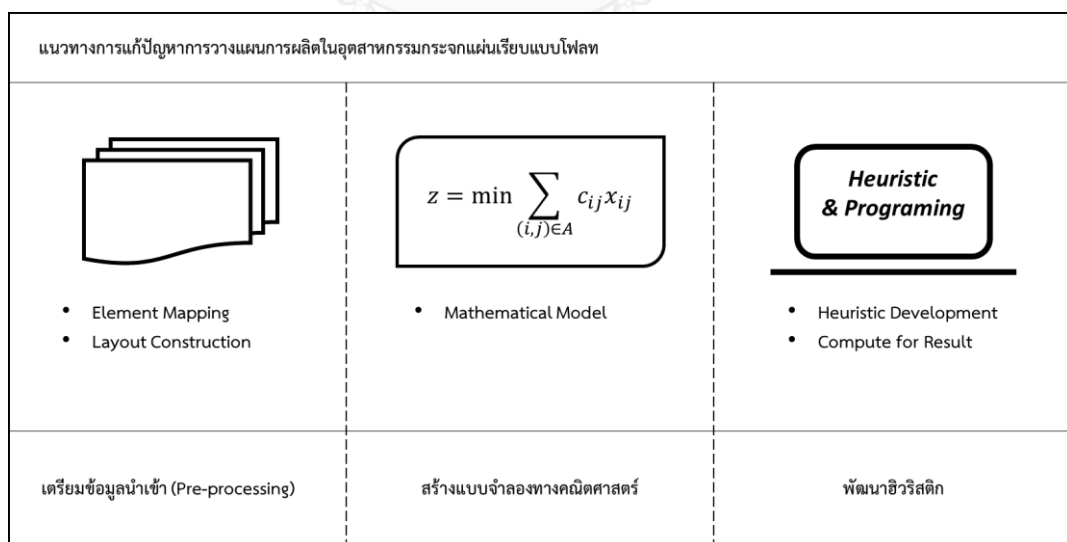
ในงานวิจัยฉบับนี้ ระบบการวางแผนการผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบโพลทจะถูกพัฒนาขึ้นโดย ตั้งอยู่บนพื้นฐานดังนี้

1. เครื่องจักรที่ใช้ในการหลอมและดึงขึ้นรูปมีเครื่องเดียว ทำให้ระบบการผลิตกระจกแผ่น เรียบแบบโพลทที่สนใจเป็นระบบสายการผลิตเดี่ยว (Single Machine)
2. กำหนดให้กระบวนการตัดแบ่ง และจัดเก็บไม่เกิดสินค้าเสียเปล่า
3. การวางแผนการผลิตที่พัฒนาขึ้นไม่พิจารณาการเกิดของเสีย (Defect) ระหว่างการผลิต กล่าวคือ ในกระบวนการผลิตสามารถผลิตสินค้าโดยไม่มีของเสีย
4. ข้อมูลคำสั่งซื้อ (Demand) ที่นำเข้ามาเป็นข้อมูลที่ทราบแน่นอนและไม่มีการเปลี่ยนแปลง ระหว่างการวางแผน (Deterministic)

5. ไม่มีการแยกผลิตภายในล็อตของคำสั่งซื้อ กล่าวคือ หากมีคำสั่งซื้อที่ต้องการผลิตกระดาษขนาด 30 cm. x 30 cm. x 5 mm. จำนวน 100 แผ่น จะต้องดำเนินการผลิตจนครบ 100 แผ่นจึงจะสามารถเปลี่ยนไปผลิตตามคำสั่งซื้ออื่นได้
6. ในการจัดวางรูปแบบการตัดจะมีการวางแบบของชิ้นงานกระดาษได้เพียงแบบเดียวเท่านั้น
7. เครื่องจักรสามารถตัดและจัดเก็บกระดาษได้ไม่จำกัดจำนวนในหนึ่งสแนป

3.3 แนวทางการดำเนินงาน

ปัญหาการวางแผนการผลิตกระดาษเรียบแบบโฟลทในปัจจุบันถูกพิจารณาเป็นปัญหาการวางแผนการผลิต (Production Problem) ซึ่งมีวิธีการแก้ปัญหาที่แพร่หลาย อย่างไรก็ตามในงานวิจัยฉบับนี้จะมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายแบบ Asymmetric Traveling Salesman Problem with Time Windows (ATSPTW) เพื่อแก้ปัญหาการวางแผนการผลิต เพื่อให้เกิดแนวทางการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เพื่อความเข้าใจที่มากขึ้นแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานได้ถูกอธิบายใน รูปที่ 3-4



รูปที่ 3-3 ขั้นตอนการแก้ปัญหา

จากรูปที่ 3-3 แนวทางการแก้ปัญหาของงานวิจัยฉบับนี้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ

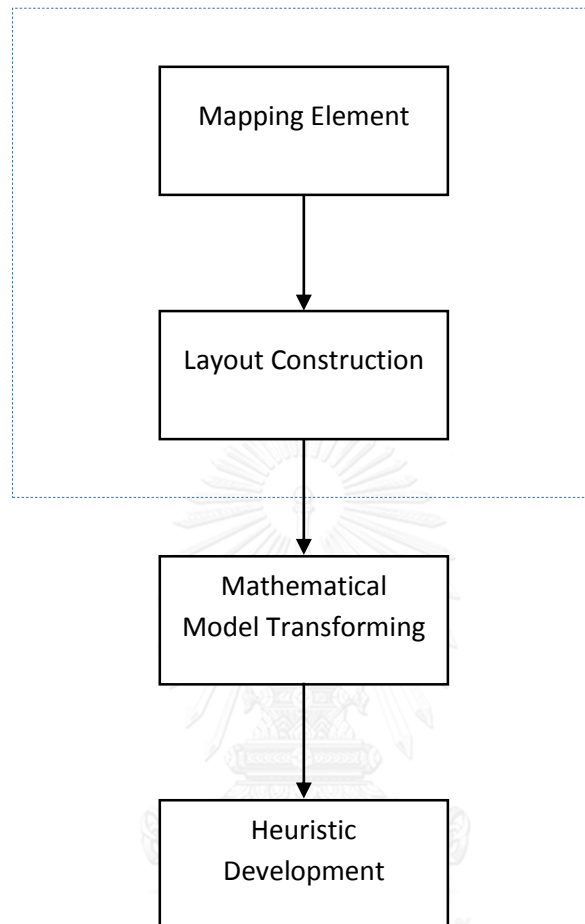
1. การเตรียมข้อมูลนำเข้า (Pre-processing) เป็นขั้นตอนการเตรียมข้อมูลก่อนนำไปแก้ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนย่อย คือ
 - a. การกำหนดข้อมูลที่จะนำมาใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Element Mapping) จากข้อมูลคำสั่งซื้อ (Order) ที่ได้จากลูกค้า โดยข้อมูลที่จะนำมาใช้ ได้แก่ ความหนาของแผ่นกระจก ความกว้างของแผ่นกระจก ความยาวของแผ่นกระจก จำนวนที่ต้องการ เวลาส่งมอบสินค้า จำนวนซีทต่อหนึ่งสแนป ความกว้างของสแนป จำนวนสแนป เวลาที่ใช้ในการผลิต ซึ่งแสดงในตัวอย่างใน ตารางที่ 3.1
 - b. การพิจารณาการจัดวางรูปแบบการตัด (Layout Construction) ที่เหมาะสม โดยเปรียบเทียบเศษกระจกที่เกิดขึ้นจากขอบการจับของเอตจโรล เนื่องจากขนาดของเศษกระจกที่เกิดขึ้นจากรอยจับมีค่าเท่ากันสำหรับทุกความกว้างของสแนป เมื่อความยาวในการผลิตเพิ่มขึ้นเศษกระจกที่เกิดขึ้นจึงมีค่ามากตามไปด้วย การพิจารณาการจัดวางจึงมุ่งเน้นเปรียบเทียบลักษณะของการจัดวางกระจกภายใน 1 สแนป ทั้งแนวนอน และแนวตั้งของแผ่นกระจก เพื่อลดระยะเวลา และความสูญเสียจากรอบจับกระจกของการผลิต

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างข้อมูลนำเข้า

Job	Thickness	amount	due (min.)	width	length	sheet/snap	snap w.	snap	fin (min.)
1	0.16	400	17280	50	70	8	400	50	190.6667
2	0.16	350	10080	120	80	2	240	175	450
3	0.16	350	8640	110	50	3	330	117	175
4	0.2	400	8640	80	40	5	400	80	145.875
5	0.16	350	10080	90	40	3	270	117	166.6667
6	0.16	450	5760	120	100	3	360	150	163.38
7	0.16	350	5760	60	60	5	300	70	280
8	0.16	350	8640	90	70	3	270	117	145.875
9	0.16	350	11520	90	40	3	270	117	145.875
10	0.136	450	14400	100	50	4	400	113	225
11	0.16	400	17280	50	70	8	400	50	190.6667
12	0.2	350	15840	100	90	3	300	117	146
13	0.16	350	15840	100	70	3	300	117	187.5
14	0.2	450	12960	70	60	6	420	75	210.06
15	0.16	350	12960	40	40	8	320	44	163.38
16	0.16	350	15840	120	110	2	240	175	1750
17	0.2	350	15840	100	100	3	300	117	233.4
18	0.16	350	17280	90	100	3	270	117	280
19	0.136	400	15840	120	70	3	360	134	233.4
20	0.16	450	17280	90	90	5	450	90	270

2. การประยุกต์ปัญหาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการแปลงปัญหาการวางแผนการผลิตเป็นปัญหา ATSPTW แล้วทำการแก้ปัญหา โดยกำหนดให้ Node แทน คำสั่งซื้อ (Order) และ Arc แทน ความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนงาน ดังแสดงใน ตารางที่ 3.1
3. การพัฒนาฮิวริสติก เนื่องจากปัญหา ATSPTW เป็นปัญหาที่ได้รับการพิสูจน์ว่าเป็นหนึ่งในปัญหา NP-complete (Karp, 1972) โดยปัญหา NP-complete เมื่อมีขนาดเล็กจะสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ (Optimal Solution) แต่เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น เวลาในการหาคำตอบจะไม่ได้เพิ่มขึ้นในรูปแบบเส้นตรง เป็นผลทำให้ต้องนำฮิวริสติกมาประยุกต์ใช้หาคำตอบที่ดีและเหมาะสมในเวลาที่ยรวดเร็ว

Pre-Processing



รูปที่ 3-4 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานของแนวทางการแก้ปัญหา

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model)

- ค่าดัชนี (Index)

$$I = \emptyset, 1, 2, 3, \dots, N \quad N = \text{จำนวนคำสั่งซื้อทั้งหมด}$$

$$A = (i, j), i, j \in I \text{ และ } i \neq j$$

- ค่าคงที่ (Parameters)

$$c_{ij} = \text{ปริมาณเศษกระจกที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนงานจากงาน } i \\ \text{เป็นงาน } j, i, j \in I$$

$$t_{ij} = \text{เวลาการปรับตั้งที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนงานจากงาน } i \text{ เป็นงาน } j, \\ i, j \in I$$

$$s_i = \text{เวลาที่ใช้ในการทำงาน } i, i \in I$$

$$l_j = \text{เวลาที่ช้าที่สุดที่สามารถเริ่มทำงาน } j, j \in I$$

$$p_i = \text{ค่าปรับ (Penalty cost) เมื่อเกิดการส่งมอบสินค้าสายในงาน } i, \\ i \in I$$

- ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

$$x_{ij} \begin{cases} = 1 \text{ เมื่อเปลี่ยนงานจากงาน } i \text{ เป็นงาน } j, i, j \in I \\ = 0 \text{ กรณีอื่นๆ} \end{cases}$$

$$k_i = \text{ตัวแปร Counter ที่ตำแหน่ง } i, i \in I$$

$$b_i = \text{เวลาที่เริ่มทำงาน } i, i \in I$$

$$q_i = \text{ระยะเวลาที่งาน } i \text{ เสร็จเข้าไปจากกำหนดส่งมอบ, } i \in I$$

- ฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function)

$$z = \min \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in I} p_i q_i \quad (1)$$

ฟังก์ชันจุดประสงค์ (1) ต้องการที่จะลดการสูญเสียหรือเศษกระจุกที่เกิดจากการผลิตให้เหลือน้อยที่สุดโดยในพจน์แรกเป็นผลรวมของเศษกระจุกที่เกิดขึ้น ในขณะที่พจน์ที่สองแสดงถึงค่าปรับโทษ (Penalty Cost) ที่เกิดจากการส่งมอบงานไม่ทัน

- ข้อจำกัด (Constraints)

$$\sum_{\{j \in I, (i,j) \in A\}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{\{j \in I, (j,i) \in A\}} x_{ji} = 1 \quad \forall j \in I \quad (3)$$

เนื่องจากเศษกระจุกที่เกิดขึ้นจากการผลิตของคำสั่งซื้อจะอยู่ในรูปแบบไม่สมมาตร ข้อจำกัดที่ (2) กำหนดให้เกิดเส้นทางของทุกคำสั่งซื้อ โดยแต่ละคำสั่งซื้อสามารถผ่านเข้าได้เพียงครั้งเดียว เช่นเดียวกับ ข้อจำกัดที่ (3) กำหนดให้เส้นทางของทุกคำสั่งซื้อสามารถออกได้เพียงครั้งเดียว

$$b_j \geq b_i + s_i x_{ij} + t_{ij} x_{ij} - M(1 - x_{ij}) \quad \forall i \in I, j \in I \quad (4)$$

$$b_j + q_j \leq l_j + s_j \quad \forall j \in I \quad (5)$$

$$b_j \leq l_j - s_j - t_{j\emptyset} \quad \forall j \in I \quad (6)$$

ข้อจำกัดที่ (5) กำหนดให้ไม่เกิดการดำเนินงานที่เมื่อทำแล้วจะเกินกำหนดเวลาเกิดขึ้น โดยหากเกิดการสายขึ้นค่า q_j จะมีค่าขึ้นเพื่อนำไปคิดในฟังก์ชันจุดประสงค์ (1) โดยมี ข้อจำกัดที่ (4) แสดงถึงเวลาที่เริ่มงาน j เท่ากับเวลาที่เริ่มทำงาน i บวกกับเวลาทำงาน และเวลาปรับตั้งสำหรับงานดังกล่าว

สำหรับข้อจำกัดที่ (6) กำหนดให้คำสั่งซื้อแรก และคำสั่งซื้อสุดท้ายที่จะถูกผลิตต้องเริ่มและสิ้นสุดที่ Node Depot ที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อให้ผู้ผลิตสามารถเข้าใจลำดับก่อนหลังของการผลิตได้อย่างถูกต้อง

นอกจากนี้ข้อจำกัดที่ (4), (5), (6) ยังทำหน้าที่จำกัดค่าตอบของการผลิตสินค้าให้ไม่เกิดเส้นทางย่อย (Subtour Elimination) อีกด้วย

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in A \quad (7)$$

$$b_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (8)$$

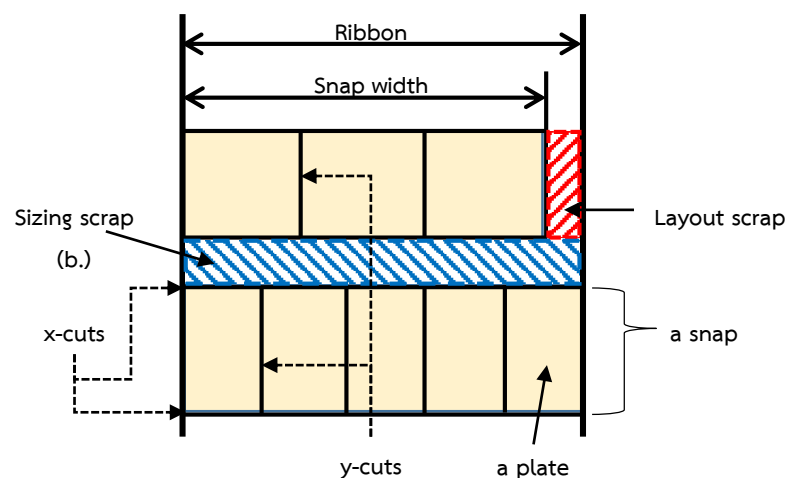
$$k_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (9)$$

$$q_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (9)$$

ข้อจำกัดที่ (7) , (8) , (9) แสดงถึงค่าจำกัดของตัวแปรต่างๆ

3.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ลูกค้า หมายถึง บริษัทที่ทำการสั่งซื้อสินค้า
2. คำสั่งซื้อ (Order) หมายถึง ความต้องการสินค้าของลูกค้าที่อยู่ในรูปของ ขนาด ชนิด จำนวน และเวลาที่ต้องการรับสินค้า
3. สินค้า หมายถึง กระจกแผ่นเรียบ
4. กระจกโฟลท (Float glass) หมายถึง กระจกแผ่นเรียบที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยการดึงขึ้นรูปในแนวนอน
5. สแนป (Snap) หมายถึง กระจกหนึ่งแผ่นใหญ่ที่ได้จากการตัดตามแนวขวาง ก่อนจะนำไปตัดแยกเป็นแผ่นย่อยอีกครั้งหนึ่ง ดังแสดงใน รูปที่ 3-5
6. เศษกระจก (Scrap) หมายถึง เศษกระจกที่เกิดจากกระบวนการผลิตแบบโฟลท โดยจะประกอบไปด้วยสองส่วน ได้แก่ เศษส่วนเกินจากการตัดแบ่งจากสแนป (แสดงใน รูปที่ 3-5a.) และกระจกที่ไม่ได้ขนาดที่เกิดขึ้นระหว่างการปรับเปลี่ยนขนาดของกระจก (แสดงใน รูปที่ 3-5 b.)



รูปที่ 3-5 สแนปและส่วนประกอบ

บทที่ 4

ฮิวริสติกสำหรับการวางแผนการผลิตในอุตสาหกรรมผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบโพลท

สืบเนื่องมาจากงานวิจัยของ Karp (1972) และด้วยการที่ปัญหาในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาที่มีขนาดใหญ่ ส่งผลให้การพัฒนาฮิวริสติกเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าวเป็นสิ่งจำเป็น บทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดและอธิบายถึงขั้นตอนการแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายด้วยฮิวริสติกเพื่อใช้ในการวางแผนการผลิตกระจกแบบโพลท โดยจะประกอบไปด้วย 3 หัวข้อ คือ

1. ข้อมูลที่ใช้ประกอบการวางแผนการผลิต
2. กระบวนการตัดสินใจของฮิวริสติก
3. ตัวอย่างการคำนวณ

4.1 ข้อมูลที่ใช้ประกอบการวางแผนการผลิต

ข้อมูลนำเข้าที่นำมาใช้ในการสร้างฮิวริสติกสำหรับการวางแผนการผลิต รวมถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นข้อมูลชุดเดียวกัน สามารถแยกได้ออกเป็นสองส่วน คือ

1. ข้อมูลความต้องการของลูกค้า (คำสั่งซื้อ) แสดงใน ตารางที่ 4.1 ประกอบไปด้วย
 - ขนาดของสินค้า คือ ขนาดของแผ่นกระจกที่ลูกค้าต้องการ ประกอบไปด้วย ความกว้าง ความยาว และ ความหนา มีหน่วยเป็นนิ้ว และมิลลิเมตร สำหรับ ความหนาตามลำดับ
 - จำนวนของสินค้า คือ จำนวนแผ่นกระจกที่ต้องการ มีหน่วยเป็นแผ่น
 - เวลาในการส่งมอบ มีหน่วยเป็น นาที

ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างข้อมูลนำเข้าหลังผ่านการคำนวณ

Job	Thickness	amount	due (min.)	width	length	sheet/ snap	snap w.	snap	fin (min.)
1	0.16	400	17280	50	70	8	400	50	190.6667
2	0.16	350	10080	120	80	2	240	175	450
3	0.16	350	8640	110	50	3	330	117	175
4	0.2	400	8640	80	40	5	400	80	145.875
5	0.16	350	10080	90	40	3	270	117	166.6667
6	0.16	450	5760	120	100	3	360	150	163.38
7	0.16	350	5760	60	60	5	300	70	280
8	0.16	350	8640	90	70	3	270	117	145.875
9	0.16	350	11520	90	40	3	270	117	145.875
10	0.136	450	14400	100	50	4	400	113	225
11	0.16	400	17280	50	70	8	400	50	190.6667
12	0.2	350	15840	100	90	3	300	117	146
13	0.16	350	15840	100	70	3	300	117	187.5
14	0.2	450	12960	70	60	6	420	75	210.06
15	0.16	350	12960	40	40	8	320	44	163.38
16	0.16	350	15840	120	110	2	240	175	1750
17	0.2	350	15840	100	100	3	300	117	233.4
18	0.16	350	17280	90	100	3	270	117	280
19	0.136	400	15840	120	70	3	360	134	233.4
20	0.16	450	17280	90	90	5	450	90	270

2. ข้อมูลข้อกำหนดทางการผลิต ที่แสดงใน ตารางที่ 4.2 ซึ่งประกอบไปด้วย
- ความกว้างสูงสุดของริบบอน (Maximum Ribbon Width) คือ ความกว้างสูงสุดที่สามารถขึ้นรูปกระจกได้ใน 1 สแนป
 - ความหนาสูงสุดที่เครื่องจักรสามารถดึงขึ้นรูปกระจกได้
 - อัตราการดึงน้ำแก้ว คือ ความเร็วในการไหลของกระจกในระบบ ซึ่งมีผลจากขนาดของชิ้นงานกระจกที่ผลิตในขณะนั้น

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงข้อมูลข้อกำหนดทางการผลิต

Station	Information		
Tin Bath (Forming)	Thickness	2 - 16	mm.
	Width	100 - 350	Inch
	Width Expand Rate	1	Inch / min
	Width Shrink Rate	2	Inch / min
	Thickness Change rate	0.00394	Inch / min

4.2 กระบวนการเตรียมข้อมูลเพื่อนำเข้าคำนวณ

ในการนำข้อมูลคำสั่งซื้อที่ได้จากลูกค้าไปคำนวณวางแผนการผลิตนั้นการเตรียมข้อมูล หรือการแปลงข้อมูลเป็นสิ่งที่จำเป็น เนื่องจากการจัดเตรียมข้อมูลนำเข้าจะสามารถทำให้เราทราบถึงขนาดของสแนปที่เราต้องผลิตจริงได้ โดยการเตรียมข้อมูลนำเข้าจะประกอบไปด้วยขั้นตอนย่อยต่างๆ โดยพารามิเตอร์ทุกตัวได้ถูกอธิบายไว้ใน ตารางที่ 4.3 ด้านล่างนี้

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงพารามิเตอร์ต่างๆ และความหมาย

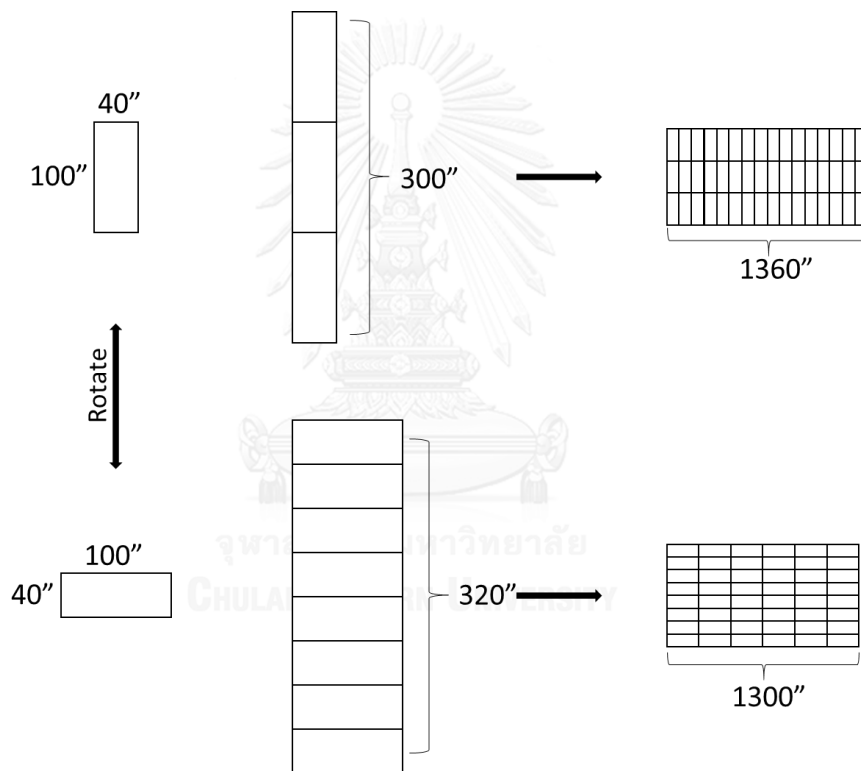
พารามิเตอร์	ความหมาย
b	ค่าคงที่ของปริมาณกระจกที่ใช้โดยผู้ผลิต
$v_{f,i}$	ความเร็วของการไหลของกระจกที่คำสั่งซื้อ i
d	ค่าความหนาแน่นของกระจก
P_i	ระยะเวลาที่ต้องใช้ในการผลิตชิ้นงานกระจกในคำสั่งซื้อที่ i
T_i	ความหนาของชิ้นงานกระจกในคำสั่งซื้อที่ i
W_i	ความกว้างของสแนปในคำสั่งซื้อที่ i
v_t	ความเร็วในการเปลี่ยนความหนาของสแนป
v_w	ความเร็วในการเปลี่ยนความกว้างของสแนป
L_i	ค่าความยาวทั้งหมดของคำสั่งซื้อ i
ΔT	ค่าความต่างของความหนาระหว่างคำสั่งซื้อ i กับ คำสั่งซื้อ $i+1$
ΔW	ค่าความต่างของความกว้างระหว่างคำสั่งซื้อ i กับ คำสั่งซื้อ $i+1$

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงพารามิเตอร์ต่างๆ และความหมาย (ต่อ)

$setup_{i,i+1}$	ระยะเวลาโดยรวมที่เกิดในเกิดจากการเปลี่ยนขนาดทั้งหมดจากคำสั่งซื้อ i ไปคำสั่งซื้อ $i+1$
$sT_{i,i+1}$	ระยะเวลาปรับตั้งค่าเครื่องจักรที่เกิดจากเปลี่ยนความหนาจากคำสั่งซื้อ i ไปคำสั่งซื้อ $i+1$
$sW_{i,i+1}$	ระยะเวลาปรับตั้งค่าเครื่องจักรที่เกิดจากเปลี่ยนความกว้างจากคำสั่งซื้อ i ไปคำสั่งซื้อ $i+1$
$A_{i,i+1}$	ปริมาณของเศษกระจกที่จะเกิดขึ้นในกรณีเปลี่ยนงานจากคำสั่งซื้อ i ไปคำสั่งซื้อ $i+1$
p_i	ค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทัน (Penalty Cost)
Ad	ค่าคงที่ที่นำมาคำนวณหาค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทัน
O_i	จำนวนชิ้นงานกระจกในคำสั่งซื้อ i
$\sum_{i \in A} O_i$	จำนวนชิ้นงานกระจกทั้งหมดในทุกคำสั่งซื้อ

1. การพิจารณาการจัดวางรูปแบบการตัด (Layout Construction) ที่เหมาะสม

ในการพิจารณาการจัดวางรูปแบบการตัดที่เหมาะสม จะทำการเปรียบเทียบเศษกระจกที่เกิดจากขอบการจับของเอตจโรล เนื่องจากขนาดของเศษกระจกที่เกิดจากรอยจับมีค่าเท่ากันสำหรับทุกความกว้างของสแนป เมื่อความยาวในการผลิตเพิ่มขึ้นเศษกระจกที่เกิดขึ้นจึงมีค่ามากตามไปด้วย การพิจารณาการจัดวางจึงมุ่งเน้นไปที่การเปรียบเทียบลักษณะของการจัดวางกระจกภายใน 1 สแนป ทั้งแนวนอน และแนวตั้งของแผ่นกระจก โดยการเปรียบเทียบจะอ้างอิงจากจำนวนที่ต้องผลิตของคำสั่งซื้อ



รูปที่ 4-1 ตัวอย่างการจัดวางรูปแบบการจัดสแนป

จากตัวอย่างใน รูปที่ 4-1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการวางชิ้นงานกระจกในแนวตั้ง กับ การวางชิ้นงานกระจกในแนวนอน ด้วยคำสั่งซื้อในตัวอย่างมีขนาด 40" x 100" จำนวน 100 ชิ้น

ในกรณีแรก จัดวางชิ้นงานกระจกในแนวตั้ง (กว้าง 100” ยาว 40”) ซึ่งภายใน 1 สแนป สามารถวางต่อกันได้เพียง 3 แผ่น ความยาวของกระจกทั้งหมดที่ต้องผลิตจะเท่ากับ 1360” ส่งผลให้เศษกระจกที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 5354.21 หน่วย

กรณีที่สอง จัดวางชิ้นงานกระจกในแนวนอน (กว้าง 40” ยาว 100”) ซึ่งภายใน 1 สแนปสามารถวางต่อกันได้ 8 แผ่น ความยาวของกระจกทั้งหมดที่ต้องผลิตจะเท่ากับ 1300” ส่งผลให้เศษกระจกที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 5118.10 หน่วย

จากการเปรียบเทียบทั้งสองกรณีดังกล่าวการวางแบบส่งผลให้เกิดเศษกระจกจากขอบการจับของเอตจโรลน้อยกว่ากรณีแรก 5% เป็นผลให้การวางในกรณีที่สองถูกเลือกใช้ในการวางแผนการผลิต

2. การคำนวณเวลาที่ต้องใช้ในการผลิตในแต่ละคำสั่งซื้อโดยพิจารณาจากความเร็วที่เหมาะสมและคุณสมบัติของชิ้นงานในการไหลของกระจกบนสายการผลิต ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสัดส่วนของปริมาณเนื้อกระจก และความหนา ความกว้าง ความหนาแน่นของกระจกที่ใช้ ดังแสดงในสมการ 10 และสมการ 11

- ความเร็วของการไหลของกระจก

$$v_f = \frac{b}{T_i \times W_i \times d} \quad (10)$$

- ระยะเวลาที่ต้องใช้ในการผลิต

$$P_i = \frac{L_i}{V_{f,i}} \quad (11)$$

ตัวอย่างที่ 1 การคำนวณเวลาที่ต้องใช้ในการผลิตในแต่ละคำสั่งซื้อกำหนดให้

จากตารางที่ 4.4 ผู้ทำวิจัยได้กำหนดให้ b ซึ่งเป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 1,173,220 หน่วย ที่คำสั่งซื้อที่ 1 กระจกมีความหนา 9 มิลลิเมตร ความกว้างของสแนปมีค่าเท่ากับ 350 นิ้ว ความยาวของสแนปมีค่าเท่ากับ 1,120 นิ้ว และความหนาแน่นของกระจกมีค่าเท่ากับ 2.5 กิโลกรัม ต่อ ลูกบาศก์เมตร เมื่อนำมาคำนวณหาความเร็วของการไหลของกระจกเพื่อหารระยะเวลาที่ต้องใช้ในการผลิตจะได้เท่ากับ

$$v_f = \frac{b}{T_i \times W_i \times d}$$

$$v_f = \frac{1,173,050}{9 \times 350 \times 2.5}$$

$$v_f = 148.958 \quad \text{นิ้ว/นาที}$$

$$P_i = \frac{1,120}{148.958}$$

$$P_i = 7.519 \quad \text{นาที}$$

เพราะฉะนั้นส่งผลให้ในงานที่ 1 ต้องใช้เวลาในการผลิตทั้งสิ้น 7.519 นาที

3. การคำนวณเวลารอที่เกิดในเกิดจากการเปลี่ยนความกว้าง และ/หรือ ความหนาของแผ่นกระจก ของแต่ละคำสั่งซื้อ ระยะเวลาปรับตั้งค่าเครื่องจักรที่เกิดจากการเปลี่ยนขนาดสามารถคำนวณได้จากสมการ 12 สมการ 13 และ สมการ 14 ดังนี้

- ระยะเวลาปรับตั้งค่าเครื่องจักรที่เกิดจากเปลี่ยนความหนา

$$sT_{i,i+1} = \frac{|T_i - T_{i+1}|}{v_t} \quad (12)$$

- ระยะเวลาปรับตั้งค่าเครื่องจักรที่เกิดจากเปลี่ยนความกว้าง

$$sW_{i,i+1} = \frac{|W_i - W_{i+1}|}{v_w} \quad (13)$$

- ระยะเวลาารรวมที่เกิดในเกิดจากการเปลี่ยนขนาด

$$setup_{i,i+1} = \max(sT_{i,i+1}, sW_{i,i+1}) \quad (14)$$

ตัวอย่างที่ 2 การคำนวณเวลาปรับตั้งเครื่องจักรเนื่องจากการเปลี่ยนขนาดของกระจก

เมื่อทำการเปลี่ยนงานจากคำสั่งซื้อที่ 1 มาคำสั่งซื้อที่ 5 ระยะเวลาปรับตั้งเครื่องจักรจะสามารถคำนวณได้จากตารางที่ 4.4 ที่คำสั่งซื้อที่ 1 ซึ่งมีความกว้าง 350 นิ้ว ความหนา 9 มิลลิเมตร หรือ 0.354 นิ้ว และคำสั่งซื้อที่ 5 มีความกว้างเท่ากับ 320 นิ้ว หรือ 0.157 นิ้ว และ ความหนา 4 มิลลิเมตร โดย v_t มีค่าเท่ากับ 0.00394 นิ้ว/นาที

$$sT_{i,i+1} = \frac{|T_i - T_{i+1}|}{v_t}$$

$$\begin{aligned}
sT_{i,i+1} &= \frac{|0.354 - 0.157|}{0.00394} \\
sT_{i,i+1} &= 47 \quad \text{นาที} \\
sW_{i,i+1} &= \frac{|W_i - W_{i+1}|}{v_w} \\
sW_{i,i+1} &= \frac{|350 - 320|}{2} \\
sW_{i,i+1} &= 15 \quad \text{นาที} \\
setup_{i,i+1} &= \max(sT_{i,i+1}, sW_{i,i+1}) \\
setup_{i,i+1} &= \max(47, 15) \\
setup_{i,i+1} &= 47 \quad \text{นาที}
\end{aligned}$$

ส่งผลให้เมื่อมีการเปลี่ยนงานจากคำสั่งซื้อที่ 1 ไปผลิตคำสั่งซื้อที่ 5 จะก่อให้เกิดเวลาปรับตั้งเท่ากับ 47 นาที

4. การคำนวณปริมาณเศษกระจก ที่จะเกิดขึ้นเมื่อทำการเปลี่ยนการผลิตหลังจากผลิตคำสั่งซื้อ i ไป คำสั่งซื้อ $i+1$ สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าความแตกต่างของขนาดของกระจก และความเร็วในการผลิต

$$\begin{aligned}
\bullet A_{i,i+1} &= \left[\frac{v_f}{2} \frac{\min(W_i, W_{i+1})(T_i + T_{i+1})|\Delta T|}{v_t} \right. \\
&\quad \left. + \frac{\Delta W^2}{v_w} \left(\min(T_i, T_{i+1}) + \frac{v_t (W_{\min(T_i, T_{i+1})} - W_{\max(T_i, T_{i+1})})}{3v_w} \right) \right] \quad (15)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\bullet A_{i,i+1} &= \left[\frac{v_f}{2} \frac{\min(W_i, W_{i+1})(T_i + T_{i+1})|\Delta T|}{v_t} \right. \\
&\quad \left. + \frac{T_{\min(W_i, W_{i+1})}}{v_w} \left(|\Delta W| - \frac{v_w |\Delta T|}{v_t} \right)^2 + \frac{|\Delta W| \Delta T^2}{v_t} - \frac{|\Delta W| \Delta T^3}{3v_t} \right] \quad (16)
\end{aligned}$$

5. ค่าปรับเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทัน (Penalty Cost)

ในงานวิจัยฉบับนี้ผู้ทำวิจัยเลือกที่จะให้คำตอบที่ได้จากฮิวริสติกมีงานที่ส่งมอบไม่ทันเกิดขึ้นได้หากคำตอบดังกล่าวก่อให้เกิดเศษกระจกที่น้อยกว่า จึงจำเป็นต้องกำหนดค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทันเพื่อให้ฮิวริสติกสามารถคำนวณหาคำตอบที่มีเศษกระจกน้อยที่สุดและจำนวนงานที่ส่งมอบไม่ทันที่เหมาะสม ค่าปรับที่เกิดจากการส่งมอบงานไม่ทันจะถูกคำนวณโดยการถ่วงน้ำหนักจากขนาดของขนาดของคำสั่งซื้อนั้นๆ คูณกับค่าคงที่ โดยค่าคงที่ดังกล่าวสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมของงาน

$$\bullet \quad p_i = Ad \left(\frac{O_i}{\sum_{i \in A} O_i} \right) \quad (17)$$

ตัวอย่างที่ 3 การคำนวณหาค่าปรับเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทัน

ในงานวิจัยฉบับนี้ผู้ทำวิจัยได้กำหนดค่า Ad ซึ่งเป็นค่าคงที่ไว้เท่ากับ 10,000 หน่วย จากข้อมูลในตารางที่ 4.4 จำนวนแผ่นกระจกทั้งหมดคือ $140 + 600 + 780 + 140 + 240$ เท่ากับ 1,900 แผ่น โดยเมื่อต้องการคำนวณหาค่าปรับของคำสั่งที่ 1 จะได้เท่ากับ

$$p_i = 10,000 \left(\frac{140}{1,900} \right)$$

$$p_i = 736.84 \quad \text{หน่วย}$$

ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างคำสั่งซื้อ

no	Width (inch)	Length (inch)	Thickness (mm)	Amount (plate)	DueDate (min)	sheet/ snap (plate)	Snap width (inch)	Snap (piece)	Feed Speed (inch/min)	Snap length (inch)	Production time (min)
1	70	40	9	140	26	5	350	28	148.9587	1120	7.518861
2	10	100	2	600	31	35	350	17	670.3143	1700	2.536124
3	50	20	3	780	16	7	350	111	446.8762	2220	4.967819
4	30	40	3	140	10	11	330	12	473.9596	480	1.012745
5	40	90	4	240	9	8	320	30	366.5781	2700	7.365415

4.3 กระบวนการตัดสินใจของฮิวริสติก

ในขณะที่ 2-opt สามารถหาคำตอบได้ในขอบเขตที่กว้างขึ้นภายในเวลาอันสั้น 3-opt สามารถขยายขนาดของ Neighborhood ทำให้เกิดการค้นหาคำตอบใหม่ขึ้นส่งผลทำให้มีโอกาสที่จะได้คำตอบที่มีคุณภาพที่ดีกว่าเดิมได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้วิธีการพัฒนาคำตอบด้วย 2-opt และ 3-opt โดยนำเอาจุดเด่นของทั้งสองวิธีมารวมกัน และสร้างฮิวริสติกที่มีพื้นฐานมาจาก Variable Neighborhood Search (VNS) โดยฮิวริสติกจะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ

1. การหาคำตอบเริ่มต้น (Initial Solution)

ในการพัฒนาคำตอบด้วย VNS คำตอบเริ่มต้นเป็นสิ่งจำเป็น โดยทั่วไปแล้วการหาคำตอบเริ่มต้นของ VNS จะเป็นการสุ่มสร้างคำตอบขึ้นมา แต่ในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ถึงธรรมชาติของปัญหาการผลิตกระดาษแผ่นเรียบที่มีแนวโน้มเลือกผลิตคำสั่งซื้อที่ทำให้เกิดเศษกระดาษน้อยที่สุดก่อน ผู้ทำวิจัยจึงเลือกใช้ Nearest Neighborhood Search (NNS) ที่ใช้การเลือกหาคำตอบโดยการค้นหาคำสั่งซื้อก่อให้เกิดของเสีย (Cost & Waste) น้อยที่สุดมาทำเป็นงานถัดไป นอกจากนี้ NNS ยังใช้เวลาในการคำนวณที่ต่ำ และให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมกับแนวคิดของปัญหา

2. การวนซ้ำด้วย VNS

หลังจากคำตอบเริ่มต้นถูกสร้างขึ้น คำตอบดังกล่าวจะถูกพัฒนาโดย 2-opt algorithm หากพบคำตอบที่ดีขึ้นครั้งแรก (First Found Solution) จะทำการออกจากการวน (Loop) เพื่อกลับไปเข้า 2-opt algorithm ใหม่ เมื่อทำการวน 2-opt algorithm ครบในทุกความเป็นไปได้แล้วแต่ยังไม่พบคำตอบที่ดีขึ้น คำตอบที่มีอยู่จะถูกนำเข้าสู่ 3-opt algorithm โดยที่การทำงานจะเป็นไปในลักษณะเช่นเดียวกับ 2-opt algorithm คือหากพบคำตอบที่ดีขึ้นครั้งแรก จะทำการออกจากการวน และนำคำตอบกลับไปเข้า 2-opt algorithm อีกครั้ง และจะทำการวนผ่าน 3-opt algorithm ในลักษณะเดียวกับ 2-opt algorithm จนครบในทุกความเป็นไปได้ คำตอบที่ได้จะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดที่สามารถหาเจอได้ (Best Found Solution)

3. Shaking

Best Found Solution ที่หาได้จะถูกนำมาทำการ Shaking โดยการสลับลำดับของคำตอบทั้งหมดในทิศทางตรงข้ามเพื่อเป็นคำตอบปลอม (Dummy) แล้วนำคำตอบดังกล่าวไปทำการวนซ้ำด้วย VNS อีกครั้ง ผลลัพธ์ของคำตอบที่ได้จะถูกนำไปมาเปรียบเทียบกับ Best Found Solution ที่ถูกเก็บไว้ในลักษณะของคำตอบปลอม หากผลลัพธ์ที่ได้จากคำตอบปลอมมีค่าผลลัพธ์ที่ดีกว่า จะกำหนดให้คำตอบที่ถูกพัฒนาขึ้นเป็น Best Found Solution แต่หากในกรณีที่คำตอบไม่ได้ให้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นเราจะเลือก Best Found Solution ล่าสุดที่มีอยู่เป็นคำตอบสุดท้ายของปัญหานี้

เพื่อความเข้าใจต่อกระบวนการทำงานของฮิวริสติกที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น เราสามารถแสดงการทำงานของฮิวริสติกได้ด้วย Pseudo code ใน รูปที่ 4-2



Pseudo Code for the Proposed Heuristic

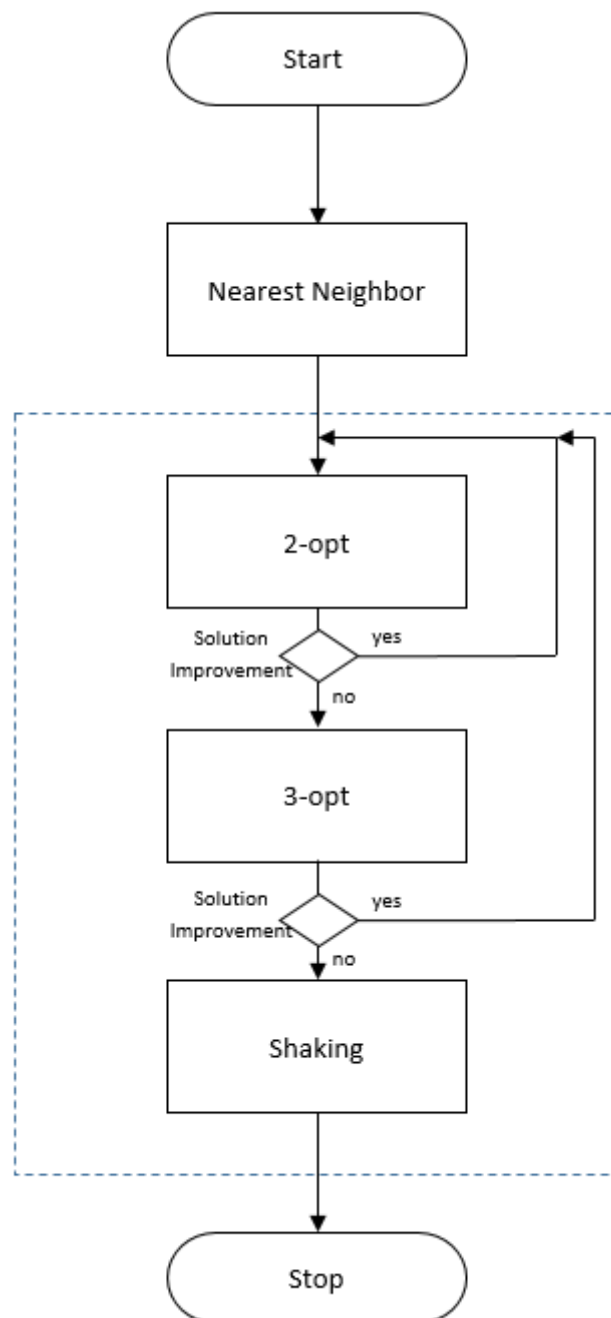
```

1: Input: A network of size  $N$ , where  $N > 1$ 
2: Find an initial solution using Nearest Neighbor algorithm
3:  $z = \text{true}$ 
4: while  $z = \text{true}$ 
5:   Call 2-opt algorithm
6:   if no better solution is found
7:     end 2-opt
8:   else
9:     return a better tour as new solution
10:    call 2-opt algorithm (Back to Line 5)
11:   end if
12:
13:  Call 3-opt algorithm
14:  if no better solution is found
15:    end 3-opt
16:     $z = \text{false}$  (terminate)
17:  else
18:    return a better tour as new solution
19:    call 2-opt algorithm (Back to Line 5)
20:  end if
21:  Call Shaking algorithm
22:  if no better solution is found
23:    end Shaking
24:  else
25:    return a better tour as new solution
26:    call 2-opt algorithm (Back to Line 5)
27:  end if
28:
29: end while
30: return best-found solution with cost-minimizing production sequence

```

Pseudo code for the proposed heuristic

รูปที่ 4-2 Pseudo code แสดงขั้นตอนการทำงานของฮิวริสติก



รูปที่ 4-3 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำของฮิวริสติก

4.4 ตัวอย่างการคำนวณของฮิวริสติก

ตัวอย่างในตารางที่ 4.5 แสดงการคำนวณของฮิวริสติกในแต่ละขั้นตอน ตัวอย่างจะประกอบไปด้วยคำสั่งซื้อเป็นจำนวน 10 คำสั่ง โดยข้อมูลนำเข้าต่างๆจะถูกแจกแจงอยู่ใน ตารางที่ 4.8 – 4.10

คำตอบที่หาโดยฮิวริสติกแรกมีค่าเท่ากับ 433,837 นิ้ว³ แต่ในตัวอย่างเกิดการ Shaking แล้วให้คำตอบที่ดีกว่าเกิดขึ้น 1 ครั้ง ทำให้คำตอบสุดท้ายของตัวอย่างนี้มีค่าเท่ากับ 352,137 นิ้ว³

ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างขั้นตอนการคำนวณฮิวริสติก

ขั้นที่	กระบวนการ	คำตอบปัจจุบัน	ผลลัพธ์
1	เริ่มต้นด้วยการหา Initial Solution ด้วย Nearest Neighborhood Search โดยจะกำหนดให้คำสั่งซื้อที่ 1 เป็นจุดเริ่มต้น	1 – 5 – 4 – 8 – 2 – 6 – 10 – 3 – 7 – 9	-
2	ค้นหาคำตอบใหม่ด้วย 2-opt	8 – 4 – 5 – 1 – 2 – 6 – 10 – 3 – 7 – 9	พัฒนา
3	ค้นหาคำตอบใหม่ด้วย 2-opt	4 – 8 – 5 – 1 – 2 – 6 – 10 – 3 – 7 – 9	พัฒนา
4	ค้นหาคำตอบใหม่ด้วย 2-opt	4 – 8 – 5 – 1 – 2 – 6 – 10 – 3 – 7 – 9	ไม่พัฒนา
5	ค้นหาคำตอบใหม่ด้วย 3-opt	3 – 4 – 8 – 5 – 1 – 2 – 6 – 10 – 7 – 9	พัฒนา
6	ค้นหาคำตอบใหม่ด้วย 2-opt	3 – 4 – 8 – 5 – 1 – 2 – 6 – 10 – 7 – 9	ไม่พัฒนา
7	ค้นหาคำตอบใหม่ด้วย 3-opt	3 – 4 – 8 – 5 – 1 – 2 – 6 – 10 – 7 – 9	ไม่พัฒนา

ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างขั้นตอนการคำนวณฮิวริสติก (ต่อ)

8	Shaking	9 - 7 - 10 - 6 - 2 - 1 - 5 - 8 - 4 - 3	(433,837)
9	ค้นหาคำตอบใหม่ด้วย 2-opt	4 - 8 - 5 - 1 - 2 - 6 - 10 - 7 - 9 - 3	พัฒนา
10	ค้นหาคำตอบใหม่ด้วย 3-opt	9 - 7 - 4 - 8 - 5 - 1 - 2 - 6 - 10 - 3	พัฒนา
11	ค้นหาคำตอบใหม่ด้วย 2-opt	9 - 7 - 4 - 3 - 10 - 6 - 2 - 1 - 5 - 8	พัฒนา
12	ค้นหาคำตอบใหม่ด้วย 2-opt	9 - 7 - 3 - 4 - 10 - 6 - 2 - 1 - 5 - 8	พัฒนา
13	ค้นหาคำตอบใหม่ด้วย 3-opt	9 - 7 - 10 - 3 - 4 - 6 - 2 - 1 - 5 - 8	พัฒนา
14	ค้นหาคำตอบใหม่ด้วย 2-opt	9 - 7 - 10 - 3 - 5 - 1 - 2 - 6 - 4 - 8	พัฒนา
15	ค้นหาคำตอบใหม่ด้วย 2-opt	9 - 7 - 10 - 3 - 6 - 2 - 1 - 5 - 4 - 8	พัฒนา
16	ค้นหาคำตอบใหม่ด้วย 3-opt	9 - 7 - 3 - 10 - 6 - 2 - 1 - 5 - 4 - 8	ไม่พัฒนา
17	ค้นหาคำตอบใหม่ด้วย 2-opt	9 - 7 - 3 - 10 - 6 - 2 - 1 - 5 - 4 - 8	ไม่พัฒนา

ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างขั้นตอนการคำนวณฮิวริสติก (ต่อ)

18	ค้นหาคำตอบใหม่ด้วย 3-opt	9 - 7 - 3 - 10 - 6 - 2 - 1 - 5 - 4 - 8	ไม่พัฒนา
19	เปรียบเทียบคำตอบใหม่กับคำตอบที่ เดิม	9 - 7 - 3 - 10 - 6 - 2 - 1 - 5 - 4 - 8	พัฒนา (352,137)
20	Shaking	8 - 4 - 5 - 1 - 2 - 6 - 10 - 3 - 7 - 9	-
21	ค้นหาคำตอบด้วย 2-opt และ 3-opt	3 - 4 - 8 - 5 - 1 - 2 - 6 - 10 - 7 - 9	ไม่พัฒนา
22	เปรียบเทียบคำตอบใหม่กับคำตอบที่ เดิม	9 - 7 - 3 - 10 - 6 - 2 - 1 - 5 - 4 - 8	ไม่พัฒนา (433,837)
23	สิ้นสุดฮิวริสติก คืนคำตอบปัจจุบัน	9 - 7 - 3 - 10 - 6 - 2 - 1 - 5 - 4 - 8	(352,137)

ตารางที่ 4.6 ปริมาณของเศษกระจกจากการเปลี่ยนคำสั่งซื้อ i ไป คำสั่งซื้อ $i+1$ มีหน่วยเป็น inch^3

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	33904	201768	74530	14593	74926	257179	71177	470036	108274
2	19180	0	95005	33727	28132	17575	147208	51194	305696	38466
3	121061	100763	0	46595	70097	55256	121905	75018	142434	50219
4	60333	52699	68645	0	32080	55645	199257	45132	288716	79539
5	20638	70330	165229	51328	0	98433	295841	93638	438714	130867
6	38533	15977	46229	32375	35794	0	99741	57573	213176	12436
7	96442	97581	76190	84533	78443	72728	0	123077	54597	58661
8	213532	271483	375091	153175	122299	335842	984614	0	908125	423127
9	206816	237763	104451	143716	136489	182384	67049	133192	0	154412
10	55829	35060	43157	46398	47712	12469	80659	72725	180951	0

ตารางที่ 4.7 ระยะเวลาปรับตั้งเครื่องจักรจากคำสั่งซื้อ i ไปคำสั่งซื้อ $i+1$ มีหน่วยเป็นนาที (min)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	500	500	125	20	625	1249	40	1124	749
2	40	0	24	30	60	125	749	80	625	250
3	40	24	0	30	60	125	749	80	625	250
4	20	375	375	0	30	500	1124	50	999	625
5	250	749	749	375	0	874	1499	24	1374	999
6	50	10	16	40	70	0	625	90	500	125
7	100	60	60	90	120	50	0	140	16	40
8	500	999	999	625	250	1124	1749	0	1624	1249
9	90	50	50	80	110	40	125	130	0	30
10	60	20	20	50	80	10	500	100	375	0

ตารางที่ 4.8 กำหนดส่งมอบของกระจกในแต่ละคำสั่งซื้อ มีหน่วยเป็นนาที (min)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2880	2880	11520	36000	33120	20160	34560	43200	36000	31680

ตารางที่ 4.9 ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตกระจกในแต่ละคำสั่งซื้อ มีหน่วยเป็นนาที (min)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	37	178	34	20	159	198	35	403	172

บทที่ 5

ผลการดำเนินงานวิจัย

5.1 ข้อมูลนำเข้าที่ใช้ในการคำนวณ

ข้อมูลนำเข้าที่ใช้ในการคำนวณในงานวิจัยนี้ถูกสร้างขึ้นจากการสุ่มด้วยการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) โดยอ้างอิงจากข้อมูลจริงที่ได้จากการเก็บจากผู้ผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบโพลทในประเทศ

ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการสุ่มขนาดความกว้างของแผ่นกระจกที่ลูกค้าต้องการด้วยการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอภายใต้ช่วง 40 – 200 นิ้ว สำหรับความกว้าง ภายใต้ช่วง 30 – 150 นิ้ว สำหรับขนาดความยาวของแผ่นกระจกที่ลูกค้าต้องการ ภายใต้ช่วง 2 – 16 มิลลิเมตร สำหรับขนาดความหนาของแผ่นกระจกที่ลูกค้าต้องการ

5.2 ผลการเปรียบเทียบด้านเวลาและด้านคุณภาพของคำตอบ

ประสิทธิภาพของฮิวริสติกในงานวิจัยฉบับนี้ ทั้งในด้านเวลา และคุณภาพของคำตอบได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยผู้ทำวิจัยได้ทำการทดสอบและเปรียบเทียบการแก้ปัญหาในขนาดที่ต่างๆ กันในช่วง 20 – 100 คำสั่งซื้อ บนคอมพิวเตอร์ที่ใช้ CPU Core-i7 2.20 GHz และแรม 8 GB. ด้วยใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio และ Matlab สำหรับการแก้ปัญหาในส่วนของฮิวริสติกและการจัดงานที่มีกำหนดส่งมอบงานเร็วสุดก่อน

ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างฮิวริสติก และการจัดงานที่มีกำหนดส่งมอบงานเร็วสุดก่อน โดยในทุกช่วงขนาดปัญหาฮิวริสติกให้ผลลัพธ์ในส่วนของปริมาณเศษกระจกที่เกิดขึ้นน้อยกว่าการจัดงานที่มีกำหนดส่งมอบงานเร็วสุดก่อนถึง 84.66% โดยเฉลี่ย ในขณะที่ด้านจำนวนงานที่ทำการส่งมอบไม่ทันทั้งสองวิธีให้ผลลัพธ์ที่ไม่แตกต่างกันมาก และทั้งสองวิธีใช้เพียงเวลาไม่กี่วินาทีในการคำนวณเพื่อทำการแก้ปัญหา

ตารางที่ 5.1 ตารางเปรียบเทียบปริมาณเศษกระจกและจำนวนงานล่าช้าระหว่างฮิวริสติกและการจัดการที่มีกำหนดส่งมอบงานเร็วสุดก่อน

Number of orders	Proposed Heuristic		Earliest Due Date		% Difference of Solution Quality
	<i>avg. scrap (inch³)</i>	<i># Late order</i>	<i>avg. scrap (inch³)</i>	<i># Late order</i>	
25	845,994	1	3,800,584	0	77.74%
30	781,240	0	4,297,222	0	81.82%
35	847,822	0	5,852,472	0	85.51%
40	857,268	0	6,588,301	0	86.99%
45	955,425	0	7,895,847	0	87.90%
50	1,014,466	0	8,453,990	0	88.00%

จากตารางที่ 5.2 แสดงให้เห็นถึงรายละเอียดทั้งด้านคุณภาพของคำตอบ และเวลาที่ใช้ในการ
คำนวณ

- ปัญหาขนาด 20 – 25 คำสั่งซื้อ ฮิวริสติกและการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลลัพธ์ที่ไม่แตกต่างกัน และทั้งสองวิธีใช้เพียงเวลาไม่กี่วินาทีในการคำนวณเพื่อแก้ปัญหา
- ปัญหาขนาด 30 – 40 คำสั่งซื้อ ฮิวริสติกและการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลลัพธ์ที่ไม่แตกต่างกัน แต่ในขณะที่ฮิวริสติกใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่ามาก ในตัวอย่างขนาด 40 คำสั่งซื้อ ทั้งสองวิธีได้ผลลัพธ์ของคำตอบที่มีค่าเท่ากัน โดยวิธีฮิวริสติกใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่า 10 วินาที ในขณะที่การแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้เวลามากกว่า 200 วินาทีเพื่อหาคำตอบ
- ปัญหาขนาด 45 – 55 คำสั่งซื้อ การแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพดีว่าเล็กน้อย กล่าวคือฮิวริสติกไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ แต่ฮิวริสติกใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ โดยในทุกขนาดตัวอย่าง ผลลัพธ์ของคำตอบที่ได้จากฮิวริสติกมีค่าแตกต่างไม่เกิน 1.5% จากการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยเวลาที่ใช้อย่างน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ
- ปัญหาขนาด 60 คำสั่งซื้อขึ้นไป การแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถหาคำตอบได้เนื่องจากหน่วยความจำไม่เพียงพอ ในขณะที่ฮิวริสติกยังสามารถหาคำตอบได้ในเวลาที่ยอมรับได้

ตารางที่ 5.2 ตารางผลการเปรียบเทียบด้านเวลาและด้านคุณภาพของคำตอบระหว่างฮิวริสติกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Number of orders	Proposed Heuristic	Optimization	% Difference of Solution Quality ^a
	<i>avg. time (sec)</i>	<i>avg. time (sec)</i>	
20	0.711	5.82	0%
25	0.684	7.44	0%
30	1.362	98.41	0%
35	2.547	130.58	0%
40	6.046	250.03 ^b	0%
45	10.197	413.55 ^b	1.13%
50	30.781	654.77 ^b	1.24%
55	34.105	769.57 ^b	1.20%
60	42.177	- ^c	- ^c
65	59.025	- ^c	- ^c
70	60.471	- ^c	- ^c
75	64.611	- ^c	- ^c
80	83.344	- ^c	- ^c
85	139.457	- ^c	- ^c
90	194.893	- ^c	- ^c
95	223.14	- ^c	- ^c
100	305.88	- ^c	- ^c

a. Percentage difference of solution quality is measured based on the optimization model.

b. A gap is set at an average of 5%.

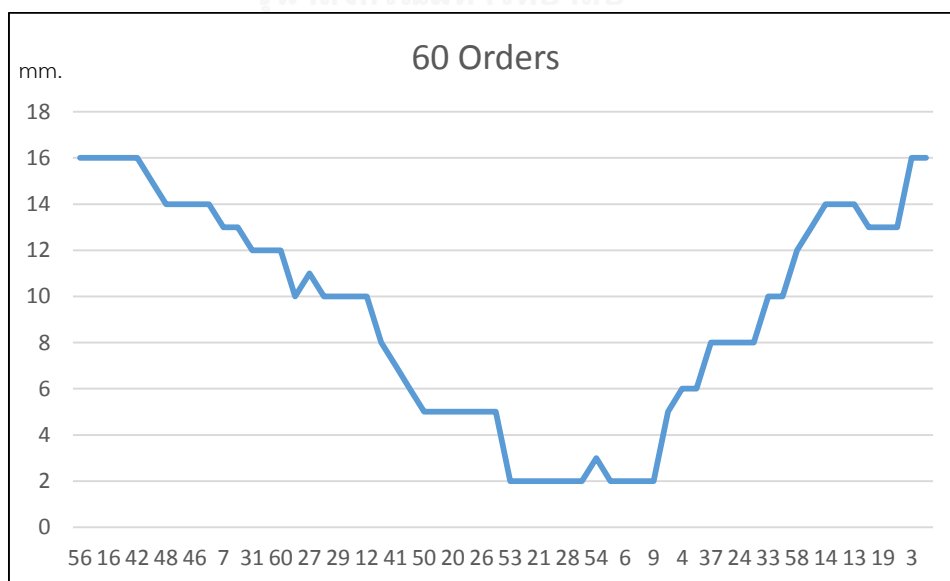
c. Run-out-of-memory error

5.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

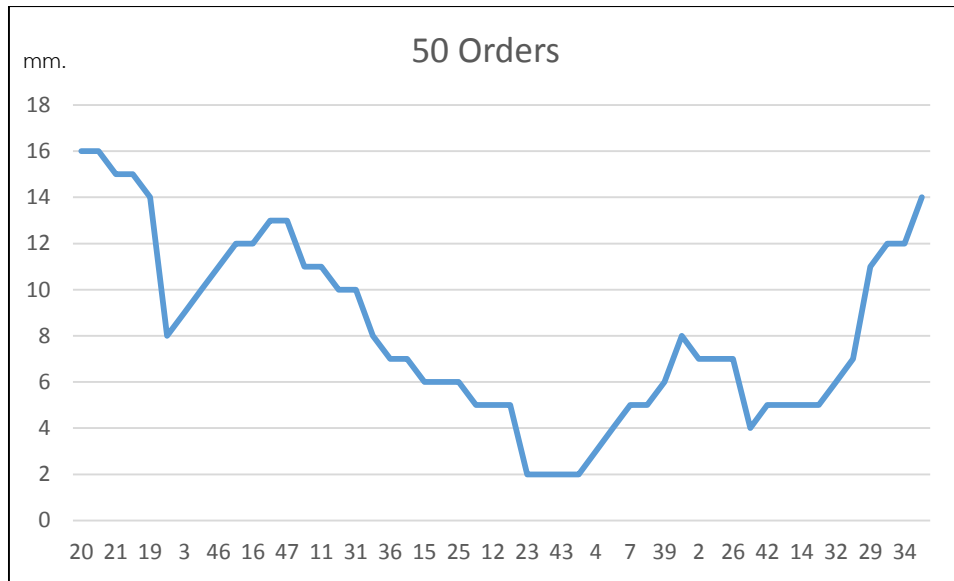
การเปลี่ยนความหนาของสแนป ก่อให้เกิดปริมาณเศษกระจกเป็นจำนวนมาก โดยการเปลี่ยนจากชิ้นงานที่มีความหนามากไปความหนาน้อย ก่อให้เกิดเศษกระจกที่น้อยกว่าเศษกระจกที่เกิดจากการเปลี่ยนจากชิ้นงานที่มีความหนาน้อยไปความหนา

จากการผลลัพธ์ของการทดสอบการทำงานของฮิวริสติกในตัวอย่างปัญหาหลากหลายขนาด แสดงให้เห็นถึงทิศทางในการเลือกผลิตคำสั่งซื้อถัดไป โดยอ้างอิงจาก รูปที่ 5-1 แผนภูมิแสดงให้เห็นว่าการเลือกผลิตคำสั่งซื้อถัดไป ฮิวริสติกมักจะเลือกคำสั่งซื้อที่มีความหนาใกล้เคียงกับคำสั่งซื้อปัจจุบัน เพื่อให้ปริมาณเศษกระจกที่เกิดจากการเปลี่ยนขนาดมีค่าน้อยที่สุด

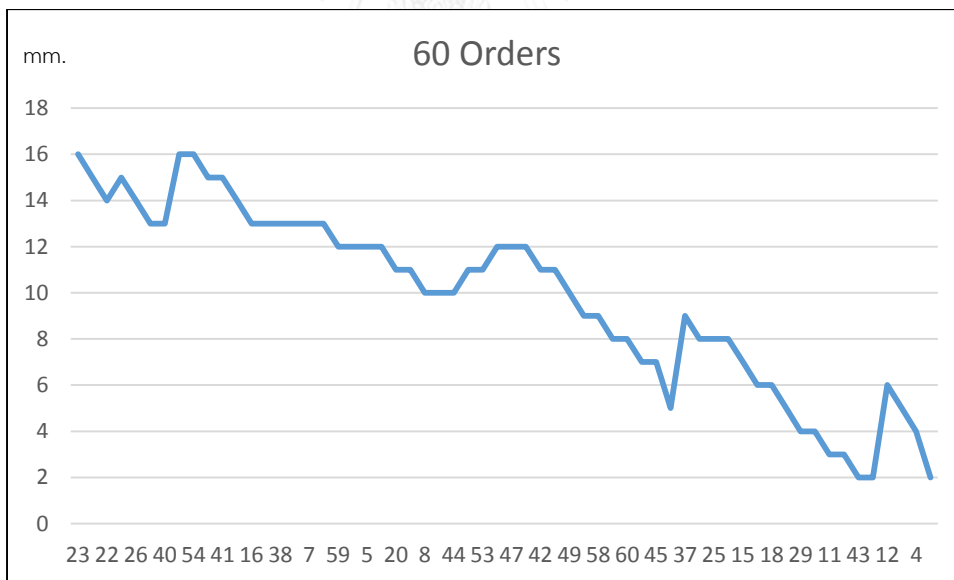
ในขณะที่ รูปที่ 5-2 ในบางช่วงของการเลือกผลิตคำสั่งซื้อถัดไปของฮิวริสติกไม่สามารถเลือกคำสั่งซื้อที่มีความหนาใกล้เคียงกับคำสั่งซื้อปัจจุบันได้ เนื่องจากติดข้อจำกัดทางด้านเวลาส่งมอบสินค้า ส่งผลให้เกิดการเลือกผลิตคำสั่งซื้อที่มีความหนาที่เปลี่ยนไปอย่างฉับพลัน โดยใน รูปที่ 5-3 ฮิวริสติกได้ทำการวางแผนการผลิตด้วยคำสั่งซื้อที่ไม่มีข้อจำกัดด้านเวลาการส่งมอบสินค้า ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนาในการผลิตจากมากที่สุด คือ 16 มิลลิเมตร ไปสู่ 2 มิลลิเมตร ตามสมมติฐานเรื่องทิศทางการเปลี่ยนไปในข้างต้น



รูปที่ 5-1 แผนภูมิเส้นแสดงการเปลี่ยนความหนาที่ตัวอย่าง 60 คำสั่งซื้อ



รูปที่ 5-2 แผนภูมิเส้นแสดงการเปลี่ยนความหนาที่ตัวอย่าง 50 คำสั่งซื้อ



รูปที่ 5-3 แผนภูมิเส้นแสดงการเปลี่ยนความหนาที่ตัวอย่าง 60 คำสั่งซื้อ โดยไม่คำนึงถึงกรอบเวลา

5.4 การวิเคราะห์ความไวของข้อมูลนำเข้า

5.4.1 การวิเคราะห์ความไวของขนาดแผ่นกระจก

รูปแบบความต้องการของลูกค้าสามารถเปลี่ยนแปลงได้อยู่ตลอดเวลา และเมื่อคำสั่งซื้อเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ การวางแผนการผลิตจำเป็นต้องวิเคราะห์และพัฒนาตาม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบความต้องการของลูกค้าอาจเกิดได้จากหลากหลายเหตุผล เช่น สภาพเศรษฐกิจที่เปลี่ยนไป แนวโน้มการบริโภค แนวโน้มการลงทุนในธุรกิจ อสังหาริมทรัพย์ที่เพิ่มมากขึ้น สิ่งเหล่านี้จะส่งผลให้คำสั่งซื้อของลูกค้าเปลี่ยนแปลงไป โดยผู้ทำวิจัยตั้งสมมติฐานว่า เมื่อลูกค้าต้องการแผ่นกระจกที่มีขนาดใหญ่เป็นจำนวนมากจะทำให้ฮิวริสติกเลือกทำงานสายมากขึ้น เนื่องจากขาดการปรับค่าปรับเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทันที่เหมาะสม โดยในหัวข้อนี้จะนำเสนอความแตกต่างและผลลัพธ์จากการเปลี่ยนไปของรูปแบบความต้องการของลูกค้าโดยยกตัวอย่างในสองกรณี ดังต่อไปนี้

- กรณีลูกค้าต้องการกระจกแผ่นใหญ่เป็นจำนวนมาก

ในกรณีนี้ผู้วิจัยได้เปลี่ยนมาทำการสุ่มด้วยการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ ภายได้ช่วง 100 – 300 นิ้ว สำหรับขนาดความกว้างของแผ่นกระจก และภายได้ช่วง 50 – 200 นิ้วสำหรับขนาดความยาวของแผ่นกระจกที่ลูกค้าต้องการ โดยใช้ความหนาเท่าเดิม

จากผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 5.3 แสดงให้เห็นถึงเวลาในการคำนวณหาคำตอบของฮิวริสติกในปัญหาที่ขนาดต่างๆ และจำนวนของคำสั่งซื้อที่ไม่สามารถผลิตได้ตามกำหนดการส่งมอบ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดปัญหาที่เท่ากันในสถานการณ์ปกติจะแสดงให้เห็นจำนวนของคำสั่งซื้อที่ไม่สามารถผลิตได้ตามกำหนดการส่งมอบที่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากเมื่อเกิดการผลิตกระจกแผ่นใหญ่ การวางแผนการผลิตจะเป็นไปได้ยากที่จะหลีกเลี่ยงการเกิดเศษกระจก ทำให้ฮิวริสติกซึ่งมีหลักการทำงานโดยจะเลือกทางเลือกที่ส่งผลให้เกิดเศษกระจกน้อยที่สุด ละเลยกำหนดการส่งมอบ แล้วเลือกการผลิตที่ก่อให้เกิดเศษกระจกน้อยที่สุดแทน

ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงเวลาในการคำนวณและจำนวนงานที่ส่งสายของกระจกแผ่นใหญ่

Number of orders	Proposed Heuristic	Late-order
	<i>avg. time (sec)</i>	<i>avg. # of order</i>
20	0.604	0
25	0.647	0
30	1.155	4
35	4.329	5
40	6.106	5
45	11.917	3
50	35.273	7
55	40.180	9
60	44.901	10

ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงเวลาในการคำนวณและจำนวนงานที่ส่งสายกระจกแผ่นเล็ก

Number of orders	Proposed Heuristic	Late-order
	<i>avg. time (sec)</i>	<i>avg. # of order</i>
20	0.514	0
25	0.703	0
30	1.506	0
35	3.556	0
40	5.050	3
45	8.197	1
50	28.144	5
55	36.005	0
60	50.114	2

- กรณีลูกค้าต้องการกระจกแผ่นเล็กเป็นจำนวนมาก

ในกรณีนี้ผู้วิจัยได้เปลี่ยนมาทำการสุ่มด้วยการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ ภายได้ช่วง 20 – 100 นิ้ว สำหรับขนาดความกว้างของแผ่นกระจก และภายได้ช่วง 10 – 80 นิ้วสำหรับขนาดความยาวของแผ่นกระจกที่ลูกค้าต้องการ โดยใช้ความหนาเท่าเดิม

จากผลลัพธ์ดังแสดงใน ตารางที่ 5.4 แสดงให้เห็นถึงเวลาในการคำนวณหาคำตอบของฮิวริสติกในปัญหาที่ขนาดต่างๆ และ จำนวนของคำสั่งซื้อที่ไม่สามารถผลิตได้ตามกำหนดการส่งมอบ จากการเปรียบเทียบกับกับผลลัพธ์จากข้อมูลในสถานการณ์ปกติจะแสดงให้เห็นปริมาณของจำนวนของคำสั่งซื้อที่ไม่สามารถผลิตได้ตามกำหนดการส่งมอบที่น้อย เนื่องจากเมื่อกระจกที่ต้องการผลิตเป็นชิ้นเล็กทำให้การจัดวางรูปแบบกระจกเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เกิดเศษกระจกที่น้อย เมื่อฮิวริสติกทำการค้นหาจะให้ความสำคัญกับเวลาส่งมอบที่มีค่าโทษในการเกิดการส่งของล่าช้า (Penalty Cost) ที่มีค่าสูงกว่าเศษกระจก ทำให้เกิดคำสั่งซื้อที่ไม่สามารถผลิตได้ตามกำหนดการส่งมอบน้อย

ตารางที่ 5.5 ตารางเปรียบเทียบจำนวนงานที่ส่งสายระหว่างกรณีกระจกชิ้นใหญ่และกระจกชิ้นเล็ก

Number of orders	Large size	Small size
	avg. # of order	avg. # of order
20	0	0
25	0	0
30	3	0
35	5	0
40	5	3
45	4	1
50	7	5
55	2	2
60	6	2

5.4.2 การวิเคราะห์ความไวของค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทัน

ข้อตกลงในการส่งมอบเป็นสิ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา ซึ่งอาจจะเกิดจากทั้งทางฝั่งลูกค้า และฝั่งผู้ผลิต โดยในการวางแผนการผลิตจริงในภาคอุตสาหกรรม ความต้องการ และข้อจำกัดต่างๆอาจจะมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทันต้องมีการปรับเปลี่ยนไปตามสถานการณ์ โดยหากผู้ผลิตต้องการให้งานที่ส่งมอบไม่ทันเป็นศูนย์ สามารถปรับค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทันให้มากขึ้น หรือในบางอุตสาหกรรมที่มีลักษณะการผลิตเพื่อเก็บเป็นสินค้าคงคลัง (Make to Stock) สามารถลดค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทันเพื่อที่จะเพิ่มโอกาสในการหาคำตอบที่สามารถลดปริมาณเศษกระจกที่เกิดจากกระบวนการผลิตให้น้อยลงกว่าการตั้งค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทันในสถานการณ์ปกติ

ในงานวิจัยฉบับนี้ผู้ทำวิจัยได้กำหนดให้ค่าคงที่ที่นำมาคำนวณหาค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทัน (Ad) มีค่าเท่ากับ 10,000 หน่วย 500,000 หน่วย ในกรณีที่ต้องการค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทันที่สูง และ 5,000 หน่วย สำหรับกรณีค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทันที่ต่ำ ในการคำนวณ

ตารางที่ 5.6 ตารางผลลัพธ์การวิเคราะห์ความไวของค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทัน

Number of Orders	Normal Penalty Cost	High Penalty Cost		Low Penalty Cost	
	avg. # of Late-order	% Difference of Solution Quality	avg. # of Late-order	% Difference of Solution Quality	avg. # of Late-order
25	0	0%	0	0%	0
30	1	-0.83%	0	-4.8%	2
35	0	0%	0	0%	0
40	1	0.72%	0	-2.85%	4
45	0	17.81%	0	-10.88%	5
50	1	26.6%	0	-38.67%	6

จากตารางที่ 5.6 แสดงผลลัพธ์ของคำตอบที่ได้จากการปรับค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทันในทั้งสามกรณี ได้แก่

- ค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทันระดับปกติ (Normal Penalty Cost)
ผลลัพธ์ของคำตอบที่ได้จะแสดงให้เห็นจำนวนงานที่สายที่มีปริมาณเล็กน้อย ในทุกๆช่วงขนาดของปัญหา
- ค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทันระดับสูง (High Penalty Cost)
ผลลัพธ์ของคำตอบที่ได้แสดงให้เห็นถึงจำนวนงานที่ส่งมอบไม่ทันมีค่าเท่ากับศูนย์ในทุกช่วงขนาดปัญหา โดยในตัวอย่างขนาดเล็กผลลัพธ์ของคำตอบที่ได้จากฮิวริสติกมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่ในขนาดปัญหา 45 – 50 คำสั่งซื้อผลลัพธ์ของคำตอบที่ได้จากฮิวริสติกมีปริมาณเศษกระจุกที่เกิดขึ้นมากกว่าฮิวริสติกที่มีค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทันในระดับปกติถึง 22.20% โดยเฉลี่ย
- ค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทันระดับต่ำ (Low Penalty Cost)

ผลลัพธ์ของคำตอบที่ได้แสดงให้เห็นถึงจำนวนงานที่ส่งมอบไม่ทันเป็นจำนวนมาก โดยในทุกขนาดตัวอย่างที่มีการส่งมอบงานไม่ทันเกิดขึ้น ผลลัพธ์ของคำตอบที่ได้จากฮิวริสติกที่ใช้ค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทันในระดับต่ำมีค่าปริมาณเศษกระจกที่น้อยกว่าฮิวริสติกที่ใช้ค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทันในระดับปกติ ตั้งแต่ 2 – 30% ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ความไวของค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทันที่กล่าวไปในข้างต้น ตารางที่ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับเปลี่ยนค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทันในทั้งสามระดับ คือ ระดับปกติ ระดับสูง และ ระดับต่ำ โดยผู้ผลิตกระจกสามารถนำข้อมูลที่มีไปปรับใช้ให้เหมาะสมกับสภาพอุตสาหกรรมของในแต่ละที่ เพื่อให้การนำฮิวริสติกมาคำนวณหาคำตอบเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

บทที่ 6

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

ธรรมชาติของอุตสาหกรรมการผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบโฟลทที่มีการผลิตแบบไหลต่อเนื่อง ไม่มีหยุด (Continuous Flow) ในกระบวนการผลิตจะประกอบไปด้วยคำสั่งซื้อจำนวนมาก ซึ่งกระบวนการผลิตดังกล่าวเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานในการผลิตสูง ก่อให้เกิดมลภาวะ รวมถึงของเสียในปริมาณมาก ส่งผลให้การวางแผนการผลิตเป็นขั้นตอนที่มีสำคัญสูง ซึ่งการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวิธีการแก้ปัญหา จึงทำให้ฮิวริสติกเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้จริง

6.1 ผลการวิจัย

สืบเนื่องจากผลการทดลองที่แสดงใน ตารางที่ 5.2 ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองของฮิวริสติกและการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นวิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสมกับช่วงปัญหาขนาดเล็กถึงปัญหขนาดกลางเท่านั้น ในทางกลับกันฮิวริสติก VNS ที่ประกอบไปด้วย 2-opt และ 3-opt ในงานวิจัยฉบับนี้ สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีในทุกขนาดของปัญหา ภายในเวลาคำนวณที่ยอมรับได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

ลักษณะของคำตอบที่ได้จากฮิวริสติกนั้น แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของการเลือกผลิตคำสั่งซื้อที่มีความหนาของกระจกใกล้เคียงกันก่อน และมีโอกาสน้อยที่จะเลือกขยับไปหาความหนาที่ต่างกับความหนาหน้ามาก ด้วยเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยเห็นว่าเราสามารถปรับช่วงในการค้นหาให้เป็นเหมาะสมกับปัญหา ด้วยการจำกัดช่วงของความหนาที่ฮิวริสติกสามารถเลือกทำได้ในลำดับถัดไป เพื่อลดเวลาให้การคำนวณหาคำตอบด้วยรอบการค้นหาเดิมในฮิวริสติกเดียวกัน

นอกจากนั้นแล้วงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการวางแผนการผลิตสำหรับผู้ผลิตกระจกแผ่นเรียบในอุตสาหกรรมกระจกที่มีไลน์การผลิตแบบไลน์เดี่ยว ข้อมูลที่นำมาใช้ประกอบการพัฒนาฮิวริสติกเป็นข้อมูลที่ได้จากโรงงานภายในประเทศเป็นหลัก รวมไปถึงข้อจำกัดต่างๆ ที่เกิดขึ้นในงานวิจัย ส่งผลให้ผู้ทำวิจัยได้เห็นถึงช่องทางการนำไปปรับใช้ในโรงงานที่มีลักษณะการผลิตที่ต่างกันออกไป ดังนี้

1. เพิ่มเศษกระจกที่เกิดจากการเก็บไม่ทัน (Cycle Time Scrap) สำหรับไลน์การผลิตที่ใช้เครื่องจักรในการจัดเก็บหรือมีความสามารถในการจัดเก็บที่มีข้อจำกัดในด้านเวลา สามารถเพิ่มเวลาการจัดเก็บขึ้นมาในการพิจารณา เพื่อให้การวางแผนการผลิตกระจกแผ่นเรียบเป็นไปอย่างเหมาะสมมากยิ่งขึ้น
2. เพิ่มคุณสมบัติและชนิดที่แตกต่างของกระจกแผ่นเรียบ ในกระบวนการผลิตกระจกแผ่นเรียบนอกจากความแตกต่างด้านขนาด ความกว้าง ความยาว ความหนา ของกระจกแผ่นเรียบแล้ว ยังมีเรื่องสีรวมถึงกระจกชนิดพิเศษแบบต่างๆ ที่สามารถนำมาร่วมพิจารณาในการวางแผนการผลิตอีกด้วย
3. เพิ่มค่าถ่วงความสำคัญและปรับเปลี่ยนค่าปรับโทษเมื่อเกิดการส่งมอบงานไม่ทันในกรณีเกิดการส่งของล่าช้า (Penalty Cost) ของแต่ละคำสั่งซื้อ ในการดำเนินการวางแผนการผลิตจริงผู้วางแผนการผลิตกระจกแผ่นเรียบสามารถเพิ่มค่าถ่วงความสำคัญและค่าโทษในกรณีเกิดการส่งของล่าช้าในแต่ละคำสั่งซื้อเพื่อป้องกันการเกิดการส่งของล่าช้าในกรณีที่แต่ละลูกค้ามีข้อกำหนดไม่เหมือนกัน

ข้อเสนอแนะที่ได้กล่าวไปข้างต้น เป็นแนวทางในการพัฒนาการแก้ปัญหาการวางแผนการผลิตในอุตสาหกรรมการผลิตกระจกแผ่นเรียบแบบโฟลท โดยในงานวิจัยนี้ได้อาศัยข้อมูลและเงื่อนไขจากโรงงานผลิตกระจกแผ่นเรียบภายในประเทศเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้เหมาะกับลักษณะและสภาพการดำเนินงานของแต่ละโรงงานในอุตสาหกรรมเดียวกัน ฮิวริสติกจำเป็นต้องได้รับการปรับแต่ง พัฒนา โดยอ้างอิงจากข้อเสนอแนะในข้างต้น ผนวกกับลักษณะปัญหาเฉพาะของแต่ละโรงงาน เพื่อให้ได้วิธีการแก้ปัญหาการวางแผนการผลิตที่มีประสิทธิภาพ

นอกเหนือจากการนำฮิวริสติกที่ได้นำเสนอไปในงานวิจัยฉบับนี้ไปใช้แก้ปัญหาการวางแผนการผลิตในอุตสาหกรรมกระจกแผ่นเรียบแบบโฟลทแล้ว ฮิวริสติกในงานวิจัยนี้ยังสามารถนำไป

ดัดแปลง เพื่อใช้กับการแก้ปัญหาการวางแผนการผลิตในอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่มีลักษณะการผลิต คล้ายคลึงกันในการผลิตอีกด้วย กล่าวคือ อุตสาหกรรมที่ขั้นตอนการผลิตสินค้าที่ก่อให้เกิดของ เสีย และมีเวลาการปรับตั้งระหว่างการเปลี่ยนงาน เช่น อุตสาหกรรมการผลิตยา อุตสาหกรรมผสม สารเคมี อุตสาหกรรมผลิตเครื่องตี๋ม เป็นต้น



รายการอ้างอิง

- ARNESEN, M. J., GJESTVANG, M., WANG, X., FAGERHOLT, K., THUN, K. & RAKKE, J. G. 2017. A traveling salesman problem with pickups and deliveries, time windows and draft limits: Case study from chemical shipping. *Computers & Operations Research*, 77, 20-31.
- ASCHEUER, N., FISCHETTI, M. & GRÖTSCHEL, M. 2001. Solving the Asymmetric Travelling Salesman Problem with time windows by branch-and-cut. *The Zuse Institute Berlin*, 90, 475-506.
- DUMAS, Y., DESROSIERS, J., GELINAS, E. & SOLOMON, M. M. 1995. An Optimal Algorithm for the Traveling Salesman Problem with Time Windows. *Operations Research*, 43, 367-371.
- GENDREAU, M., HERTZ, A. & LAPORTE, G. 1992. New Insertion and postoptimization procedures for the traveling salesman problem. *Operations Research*, 40, 1086-1094.
- GILMORE, P. & GOMORY, R. 1961. A Linear Programming Approach to the Cutting Stock Problem. *Operations Research*, 9, 849-859.
- GILMORE, P. & GOMORY, R. 1963. A Linear Programming Approach to the Cutting Stock Problem—Part II. *Operations Resesearch*, 11, 863-888.
- HANSEN, P. & MLADENOVIC, N. 2001. Variable neighborhood search: Principles and applications. *European Journal of Operational Research*, 130, 449-467.
- J.K., L. 1977. Complexity of Machine Scheduling Problems. *European Journal of Operational Research*, 1, 343-362.
- JETTANUT, J. 1994. A Computer-based Decision Support System for Production Planning and Control at the Thai Paper Company. *Industrial Engineering Asia Institute of Technology*.
- JOHNSON, D. S. & MCGEOCH, L. A. 1995. *The Traveling Salesman Problem: A Case Study in Local Optimization*. Amherst College.
- KARP, R. M. 1972. Reducibility Among Combinatorial Problems. *University of California, Berkeley*.

- KELD, H. 2000. An Effective implementation of the Lin-Kernighan traveling salesman heuristic. *European Journal of Operational Research*, 126, 106-130.
- NA, B. 2011. *Optimization of Automated Float Glass Lines*. Georgia Institute of Technology.
- NA, B., AHMED, S. & NEMHAUSER, G. 2013. A cutting and scheduling problem in float glass manufacturing. *Springer*, 95-107.
- ROHAN, A. 2011. Application of Modified 2-opt and Jumping Gene Operators in Multi-Objective Genetic Algorithm to solve MOTSP. *Department of Computer Science and IT Jaypee Institute of Information and Technology*.
- RUIZ-VANOYE, J. A., PÉREZ-ORTEGA, J., PAZOS R, R. A., DÍAZ-PARRA, O., FRAUSTO-SOLÍS, J., FRAIRE HUACUJA, H. J., CRUZ-REYES, L. & MARTÍNEZ F, J. A. 2011. Survey of polynomial transformations between NP-complete problems. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 235, 4851-4865.
- SOLOMON, M. M. 1994. An Optimal Algorithm for the Traveling Salesman Problem With Time Windows. *Institute for Operations Research and the Management Sciences*, 367-371.
- TABUCANON, M. T. & JAZMIN, L. O. 1993. Multiproduct, multistage machine requirements planning models. *Applied Mathematical Modelling*, 17.
- เนตรปฐมพร, พ. 2008. การวิเคราะห์ที่ตั้งอุตสาหกรรมกระจกในประเทศไทย. มหาวิทยาลัยศิลปกร.
- पालวงศ์, ม. 2005. ทิศทางและแนวโน้มอุตสาหกรรมกระจก. รายงานวิชาการ ฉบับที่ สพส. 3/2548. สำนักงานพัฒนาและส่งเสริมกรรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.
- มหาวิทยาลัยมหิดล 2002. โครงการพัฒนาคุณภาพผลพลอยได้ (By-product) จากกระบวนการผลิตทรายก่อสร้างเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน ในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก. *Part 1*. กรรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่: กรรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.
- ยิ้มแย้ม, ณ. 2010. กระจกและการเลือกใช้ที่เหมาะสม. สำนักบริหารมาตรฐาน 1 กลุ่ม 5 สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- ศรีปฐมสวัสดิ์, ก. 2543. ระบบการสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการวางแผนและการจัดตารางการผลิตของโรงงานผลิตกระดาษกราฟ.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ผู้ทำวิจัย นาย กนก กิติสุข เกิดเมื่อวันที่ 8 มกราคม พุทธศักราช 2535 เป็นบุตรชายคนเล็ก มีพี่สาวหนึ่งคน จบการศึกษาชั้นมัธยมจากโรงเรียน สวนกุหลาบวิทยาลัยฯ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิต วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา พุทธศักราช 2557 และทำการเข้ารับการศึกษาดูระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ในปีการศึกษา 2557

