



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

การเลือกสูตรและจัดตารางการผลิตสำหรับคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีการผลิตซ้อนทับ

Formula selection and scheduling for precast concrete with double layer production

ณัฐพล สุเรนทร์พิทักษ์ และ วิภาวี ธรรมมาภรณ์พิลาศ*

Nattapon Suranpitak and Wipawee Tharmmaphornphilas

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพ 10330

Received March 2012

Accepted June 2012

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีการผลิตซ้อนทับ โดยแต่ละงานจะต้องผลิตให้เสร็จทุกขั้นตอนการผลิตภายในแม่แบบเดียวกัน และใช้เวลาในการผลิตขั้นตอนต่างๆเท่ากันยกเว้นขั้นตอนการบ่มที่เปลี่ยนแปลงตามสูตรการผลิตที่ใช้ซึ่งมีผลต่อต้นทุนวัตถุดิบและแน่นอนว่าสูตรการผลิตที่มีต้นทุนวัตถุดิบต่ำย่อมใช้ระยะเวลาในการบ่มนานกว่า นอกจากนี้ในแต่ละขั้นตอนการผลิตจะต้องใช้ทรัพยากรเฉพาะซึ่งต้องร่วมกันในทุกแม่แบบและไมอนุญาตให้มีการใช้ทรัพยากรซ้อนทับกัน โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการฮิวริสติกเพื่อหาจำนวนงานซ้อนทับที่มากที่สุดและเลือกสูตรการผลิตให้กับงานซ้อนทับเหล่านั้นให้มีต้นทุนวัตถุดิบรวมต่ำที่สุดโดยที่ไม่มีการใดที่ผลิตเสร็จสิ้นเกินกำหนดเวลาส่งงานโดยผลจากการวิจัยพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความเหมาะสมในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาดเล็ก ในขณะที่ฮิวริสติกจะเหมาะสมกับปัญหาขนาดใหญ่ โดยให้ค่าต้นทุนวัตถุดิบรวมที่แตกต่างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่เกินร้อยละ 17

คำสำคัญ : การเลือกสูตรการผลิต การจัดตาราง ฮิวริสติก การผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีการผลิตซ้อนทับ

Abstract

This paper considers the precast production process with double layer production. To produce precast elements, multiple processes must be completed in the same mold for each job. Processing times are constant except the curing time, which depends on mixing formula. Normally, a cheaper formula requires a longer curing time than the more expensive ones. Each process requires an additional resource, which must be shared among the molds. Given base production plan, this paper proposes the mathematical model and heuristic to obtain the maximum number of double layer jobs, select their concrete formulas and schedule jobs to satisfy the due date while minimize the total production cost. The results demonstrate that the MIP model is suitable for small problems while the proposed heuristics is suitable for the more complicated problems. The heuristics provides less than 17% maximum difference from the MIP in term of the objective function value.

Keywords : Formula selection, Scheduling, Heuristics, Precast production process with double layer production

* Corresponding author. Tel.: +66-2433-2933

Email address: aiauwa@hotmail.com

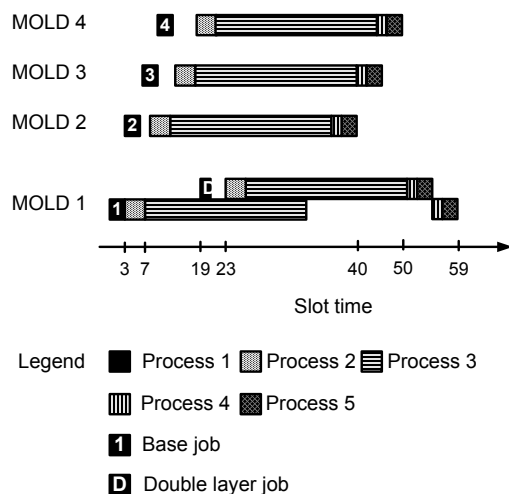
1. บทนำ

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปต่อจากงานวิจัยของ [1] ซึ่งพิจารณากระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปในลักษณะที่มีหลายแม่แบบที่อยู่กับที่และขนานกัน (Identical Parallel Fixed Location Molds) และประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนการผลิตคือ 1) การเตรียมแม่แบบ (Mold Preparing) 2) การผสมและการหล่อคอนกรีต (Concrete Mixing and Casting) 3) การบ่ม (Curing) 4) การตัดออกจากแม่แบบ (Stripping) และ 5) การขนย้ายออกจากแม่แบบ (Product Finishing and Storing) โดยที่แต่ละงานต้องผ่านขั้นตอนการผลิตต่าง ๆ นี้ตามลำดับภายในแม่แบบเดียวกันนอกจากนี้ขั้นตอนการผลิตต่างๆ ยังต้องการทรัพยากรเฉพาะอย่างที่มีเพียง 1 หน่วย ซึ่งต้องใช้ร่วมกันระหว่างแม่แบบ โดยขั้นตอนการผลิตที่ 1 ต้องการพนักงานที่มีทักษะเฉพาะ (Special Workforce) ขั้นตอนการผลิตที่ 2 ต้องการเครื่องผสมคอนกรีต (Concrete Mixing Machine) ขั้นตอนการผลิตที่ 4 ต้องการเครื่องตัด (Stripping Machine) และขั้นตอนการผลิตที่ 5 ที่ต้องการรถยกสำหรับการขนย้าย (Crane) ส่วนในขั้นตอนการผลิตที่ 3 นั้นไม่จำเป็นต้องใช้ทรัพยากรใดๆ แต่จะมีระยะเวลาในการผลิตไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับสูตรการผลิตที่ใช้ โดยสูตรการผลิตที่แตกต่างกันนั้นมีผลต่อต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ด้วย ซึ่งแน่นอนว่าสูตรการผลิตที่ใช้ระยะเวลาในการบ่มสั้นย่อมมีต้นทุนวัตถุดิบสูงกว่าสูตรการผลิตที่ใช้ระยะเวลาในการบ่มนานกว่าซึ่งงานวิจัยดังกล่าวนี้ต้องจัดสรรงานต่างๆ ให้กับแม่แบบเลือกสูตรการผลิตให้กับงาน และเรียงลำดับของงานในแต่ละแม่แบบ เพื่อให้ต้นทุนวัตถุดิบรวมที่ได้นั้นมีค่าน้อยที่สุดโดยที่ไม่มีงานใดสิ้นสุดการผลิตเกินกำหนดเวลาส่งงาน

การเพิ่มประสิทธิภาพหรือการเพิ่มกำลังการผลิตของกระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปโดยส่วนใหญ่มักใช้วิธีการเรียงลำดับของงานที่ดีเพื่อไม่ให้งานเกิดการรอคอยทรัพยากรหรือให้มีการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรมากที่สุด (2) ศึกษาการจัดเรียงลำดับของงานเพื่อให้ทรัพยากรมีการใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด ซึ่งต่อมา [3] ได้ศึกษาในลักษณะเดียวกันแต่เพิ่มประสิทธิภาพด้วยการให้สายการผลิตเป็นสายการผลิตแบบผสม (Mixed Production Line) นอกจากนั้นการเพิ่มจำนวนทรัพยากรก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้

เพิ่มกำลังการผลิต ซึ่ง [4] ได้ศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มจำนวนแม่แบบต่อเวลาเสร็จสิ้นการผลิต (Production Time) และการใช้ประโยชน์ (Utilization) ของทรัพยากร ปัญหาการจัดเรียงลำดับงานเป็นปัญหาแบบยาก (NP-Hard) ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่จะนำเสนอวิธีการทางฮิวริสติก เช่น [5] ได้นำเสนอวิธีการค้นหาแบบทาบ (Tabu Search Algorithm) และ [6] นำเสนอวิธีการทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm) เป็นต้น สำหรับการเพิ่มกำลังการผลิตในปัญหาเครื่องจักรขนาน (Parallel Machines Problem) มักจะเป็นการเพิ่มจำนวนทรัพยากรให้กับกระบวนการผลิตเพื่อให้เวลาที่ใช้ในการผลิตลดลงไม่ว่าจะเป็น [7] ที่ศึกษาการเพิ่มทรัพยากร เช่น คนงาน (Workers) ให้กับการผลิตได้ตลอดเวลาเพื่อให้เวลาในการผลิตลดลง โดยมีจุดประสงค์ให้เวลาปิดงานของระบบมีค่าน้อยที่สุด (Minimize Makespan) หรือ [8] ศึกษาปัญหาที่ความเร็วของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตขึ้นอยู่กับจำนวนทรัพยากรที่ใช้ โดยศึกษาลักษณะปัญหา 2 แบบคือ ปัญหาที่งานถูกระบุเครื่องจักรที่ต้องใช้ในการผลิตล่วงหน้าแล้วพิจารณาเฉพาะการจัดสรรทรัพยากรให้กับงานซึ่งใช้โปรแกรมเชิงจำนวนเต็มในการแก้ปัญหา และปัญหาที่ต้องพิจารณาทั้งการจัดสรรงานให้กับเครื่องจักรและการจัดสรรทรัพยากรให้กับงานซึ่งใช้ฮิวริสติกในการแก้ปัญหาโดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ จำนวนงานล่าช้าที่น้อยที่สุด [9] ศึกษาปัญหาในการจัดสรรทรัพยากรให้กับงานสำหรับปัญหาเครื่องจักรขนานที่แต่ละเครื่องจักรมีคุณสมบัติเหมือนกัน (Identical Parallel Machine) โดยสามารถเปลี่ยนแปลงจำนวนทรัพยากรและงานที่จะถูกจัดสรรได้ทุกเวลาซึ่งมีวัตถุประสงค์คือ ให้เวลาปิดงานของระบบน้อยที่สุด [10] ศึกษาทั้งการจัดสรรงานให้กับเครื่องจักรและจัดสรรทรัพยากรให้กับงาน โดยนำเสนอวิธีฮิวริสติกในการแก้ปัญหาที่มี วัตถุประสงค์ให้เวลาปิดงานของระบบมีค่าน้อยที่สุดอย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเพิ่มกำลังการผลิตด้วยวิธีการผลิตแบบซ้อนทับ (Double Layer Production) ซึ่งเป็นวิธีการที่นำผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่ง เช่น เสาเข็ม (Column) มาผลิตซ้อนทับบนผลิตภัณฑ์อีกชนิดหนึ่ง เช่น แผ่นพื้น (Floor Slabs) โดยใช้แม่แบบเดียวกันในการผลิตและมีขั้นตอนการผลิตเหมือนกันซึ่งในแต่ละขั้นตอนการผลิตจะต้องใช้ทรัพยากรร่วมกันด้วย

กระบวนการผลิตซ้อนทับมีขั้นตอนการผลิตเหมือนกับการผลิตแผ่นพื้นชั้นล่าง แต่แตกต่างกันที่ขั้นตอนการผลิตที่ 1 ซึ่งการผลิตซ้อนทับนั้นจะใช้ระยะเวลาในการผลิตสั้นกว่า และจะสามารถเริ่มขั้นตอนการผลิตนี้ที่ต่อเมื่อการผลิตแผ่นพื้นชั้นล่างได้เริ่มต้นการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 3 คือ การบ่มไปแล้วยังน้อย 6 ชั่วโมง นอกจากนี้การผลิตซ้อนทับจะต้องผลิตเสร็จสิ้นภายในขั้นตอนการบ่มของการผลิตแผ่นพื้นชั้นล่าง ซึ่งถ้าเสร็จช้ากว่าก็จะทำให้การผลิตแผ่นพื้นชั้นล่างต้องขยายเวลาการบ่มออกไปจนถึงเวลา que การผลิตซ้อนทับสิ้นสุดการผลิตโดยไม่มีผลต่อคุณภาพและสูตรการผลิตของแผ่นพื้นชั้นล่างและงานแผ่นพื้นชั้นล่าง (Base Job) สามารถให้งานซ้อนทับผลิตซ้อนทับ (Double Layer Job) ได้เพียงงานเดียวเท่านั้น และการผลิตแบบซ้อนทับแต่ละขั้นตอนการผลิตก็จะใช้ทรัพยากรที่มีอยู่เพียง 1 หน่วย ร่วมกันกับการผลิตแผ่นพื้นชั้นล่าง ยกตัวอย่างในรูปที่ 1 ที่พิจารณาให้งานซ้อนทับผลิตซ้อนทับงานแผ่นพื้นชั้นล่างในแม่แบบที่ 1 โดยขั้นตอนการผลิตที่ 1 ของงานซ้อนทับเริ่มต้นการผลิตเมื่องานแผ่นพื้นชั้นล่างบ่มไปแล้ว 6 ชั่วโมงหรือ 12 หน่วยจากนั้นขั้นตอนการผลิตที่ 2 ของงานซ้อนทับจึงเริ่มต้นการผลิตหลังจากที่ขั้นตอนการผลิตที่ 1 เสร็จสิ้น แต่จะพบว่างานซ้อนทับมีการใช้ทรัพยากรซ้อนทับกับงานแผ่นพื้นชั้นล่างในแม่แบบที่ 4 จึงเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 2 ของงานซ้อนทับ และขั้นตอนการผลิตที่ 3 ของงานซ้อนทับก็จะเริ่มต้นการผลิตทันทีเมื่อขั้นตอน การผลิตที่ 2 เสร็จสิ้น และขั้นตอนการผลิตที่ 4 ของงานซ้อนทับก็จะเริ่มต้นการผลิตเมื่อขั้นตอนการผลิตที่ 3 เสร็จสิ้นการผลิต จนกระทั่งถึงขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานซ้อนทับที่เริ่มต้นการผลิตหลังจากที่ขั้นตอนการผลิตที่ 4 เสร็จสิ้น แต่จะพบว่าขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานซ้อนทับสิ้นสุดการผลิตเกินเวลาเสร็จสิ้นการผลิตในขั้นตอนการบ่มของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง ดังนั้นงานแผ่นพื้นชั้นล่างจึงต้องใช้เวลาการบ่มเพิ่มขึ้นเพื่อให้งานซ้อนทับสิ้นสุดการผลิตภายในระยะเวลาการบ่มของงานแผ่นพื้นชั้นล่างและจะส่งผลให้ขั้นตอนการผลิตที่ 4 และ ขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานแผ่นพื้นชั้นล่างต้องเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตด้วยเช่นกัน



รูปที่ 1 การผลิตซ้อนทับ

บทความนี้จะนำเสนอวิธีการจัดตารางการผลิตที่ต้องผลิตไปตามลำดับขั้นตอนและไม่มีการใช้ทรัพยากรซ้อนทับกันของการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีการผลิตซ้อนทับเพื่อให้ได้จำนวนงานซ้อนทับมากที่สุดภายใต้จำนวนงานแผ่นพื้นชั้นล่าง สูตรการผลิต และลำดับการผลิตของแผ่นพื้นชั้นล่างที่กำหนด โดยงานซ้อนทับจะต้องเลือกงานแผ่นพื้นชั้นล่างเพื่อจะใช้ในการซ้อนทับและจะต้องเลือกสูตรการผลิตที่ทำให้ต้นทุนวัตถุดิบรวมของงานซ้อนทับมีค่าน้อยที่สุด โดยที่ตารางการผลิตจะต้องไม่มีงานใดที่ผลิตเสร็จเกินกำหนดเวลาส่งงาน ซึ่งปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยที่ส่วนแรก คือ การหาจำนวนงานซ้อนทับที่มากที่สุดที่สามารถซ้อนทับแล้วไม่มีงานใดเกินกำหนดเวลาส่งงาน (Due Date) และส่วนที่สองเป็นการเลือกสูตรการผลิตที่ทำให้มีต้นทุนวัตถุดิบรวม (Total Product Cost) มีค่าน้อยที่สุดและจัดตารางการผลิตที่เหมาะสม

ในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของการหาจำนวนงานซ้อนทับที่มากที่สุด และการเลือกสูตรการผลิตของงานซ้อนทับซึ่งจะนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และฮิวริสติกและผลการวิจัย

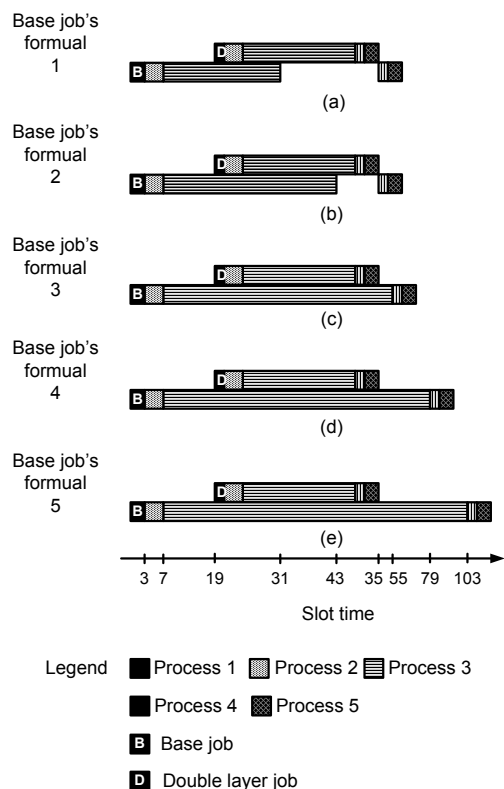
2. การหาจำนวนงานซ้อนทับ

งานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะงานซ้อนทับ ภายใต้งานแผ่นพื้นชั้นล่างที่กำหนดโดยไม่อนุญาตให้งานแผ่นพื้นชั้นล่างเปลี่ยนสูตรการผลิตและสลับลำดับ การผลิตแต่สามารถเลื่อนเวลา

เริ่มต้นในตารางการ ผลิตได้ โดยการหาจำนวนงานซ้อนทับที่มากที่สุดจะกำหนดให้งานซ้อนทับใช้สูตรการผลิตที่มีระยะเวลาในการบ่มสั้นที่สุด คือ สูตรการผลิตที่ 1 และกำหนดตารางการผลิตเพื่อยืนยันว่า จำนวนงานซ้อนทับที่ได้นั้นมีความเป็นไปได้ (Feasible Solution) ที่สามารถให้งานทุกงานทั้งงานแผ่นพื้นชั้นล่างและงานซ้อนทับผลิตเสร็จทันกำหนดเวลาส่งงาน โดยงานซ้อนทับที่ใช้สูตรการผลิตที่ 1 เมื่อผลิตซ้อนทับบนงานแผ่นพื้นชั้นล่างแล้วอาจส่งผลกระทบต่อให้งานแผ่นพื้นชั้นล่างต้องใช้ระยะเวลาการผลิตเพิ่มขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับสูตรการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง จากรูปที่ 2(a) เมื่อซ้อนทับบนงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้สูตรการผลิตที่ 1 จะพบว่า งานแผ่นพื้นชั้นล่างต้องใช้ระยะเวลาในการผลิตเพิ่มขึ้นถึง 22 หน่วย และถ้างานแผ่นพื้นชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 2 งานแผ่นพื้นชั้นล่างจะใช้ระยะเวลาในการผลิตเพิ่มขึ้นเพียง 10 หน่วยดังรูปที่ 2(b) แต่ถ้า งานแผ่นพื้นชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 3 ถึง สูตรการผลิตที่ 5 จะพบว่า งานแผ่นพื้นชั้นล่างไม่จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการผลิตเพิ่มขึ้นเลยดังรูปที่ 2(c-e) ดังนั้นในการพิจารณางานแผ่นพื้นชั้นล่างที่จะใช้ซ้อนทับ เมื่องานแผ่นพื้นชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 1 ต้องมีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงาน (Time Remaining Before Due Date) ในแม่แบบอย่างน้อย 22 หน่วย ซึ่งไม่มีโอกาสเป็นไปได้ เนื่องจากระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงานมากเช่นนี้จะทำให้งานแผ่นพื้นชั้นล่างในแม่แบบนั้นเลือกใช้สูตรการผลิตที่มีระยะเวลาในการบ่มนานกว่า หรือมีต้นทุนวัตถุดิบสูงกว่าสูตรการผลิตที่ 1 ดังนั้นในการผลิตแบบซ้อนทับจะไม่เลือกงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้สูตรการผลิตที่ 1 และถ้างานแผ่นพื้นชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 2 ก็ต้องมีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงานอย่างน้อย 10 หน่วย

การเลือกลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างในการซ้อนทับจะพิจารณาจากงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่มีระยะเวลาในการบ่มนานก่อน เนื่องจากงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่มีระยะเวลาในการบ่มนานสามารถให้งานซ้อนทับมีความยืดหยุ่นในการเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงตารางการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่างซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้มักจะส่งผลกระทบให้เกิดตารางการผลิตที่เป็นไปไม่ได้ นอกจากนี้ยังพิจารณาเลือกลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างในการจัดสรรงานซ้อนทับแบบสุ่มโดยไม่คำนึงถึงระยะเวลาบ่มของงานแผ่นพื้นชั้นล่างดังนั้นลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่าง (Base

Job Sequencing) ที่พิจารณาจึงมี 2 วิธี โดยวิธีที่ 1 คือการเรียงลำดับตามสูตรการผลิตที่ใช้ระยะเวลาในการบ่มนานไปสั้น โดยพิจารณาลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างจากงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้สูตรการผลิตที่มีระยะเวลาในการบ่มนานและมีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงานในแม่แบบนั้นมากที่สุดก่อน และวิธีที่ 2 คือการเรียงลำดับตามลำดับงานที่ผลิต โดยพิจารณาลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างจากงานที่ 1 งานที่ 2 จนกระทั่ง งานแผ่นพื้นชั้นล่างงานสุดท้ายซึ่งมีการใช้สูตรการผลิตที่มีระยะเวลาในการบ่มนานและสั้นสลับๆ กันไป



รูปที่ 2 งานซ้อนทับใช้สูตรการผลิตที่ 1 ซ้อนทับบนงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้สูตรการผลิตต่างๆ

จากลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ได้ ขั้นตอนต่อไปจะหาจำนวนงานซ้อนทับด้วยการจัดสรรงานซ้อนทับให้กับงานแผ่นพื้นชั้นล่างแล้วตรวจสอบความเป็นไปได้ของการซ้อนทับนั้นด้วยการจัดตารางการผลิต ซึ่งในการจัดสรรงานซ้อนทับจะพิจารณาที่ละขั้นตอนการผลิตร่วมกับตารางการผลิตของการผลิตแผ่นพื้นชั้นล่าง โดยเริ่มต้นจากขั้นตอนการผลิตที่ 1 ของงานซ้อนทับที่เริ่มต้นการผลิตได้หลังจากที่งานแผ่น

พื้นที่ชั้นล่างที่ถูกซ้อนทับผลิตขั้นตอนที่ 3 คือ การบ่มไปแล้ว 12 หน่วย จากนั้นให้ตรวจสอบการใช้ทรัพยากรร่วมกันระหว่างงานแผ่นพื้นชั้นล่างกับงานซ้อนทับ ซึ่งถ้าพบว่า ทรัพยากรมีการซ้อนทับกันให้พิจารณาต่อไปว่า งานแผ่นพื้นชั้นล่างหรืองานซ้อนทับที่มีเวลาเริ่มต้นการผลิตช้ากว่าก็จะให้เลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตของงานนั้นออกไป ซึ่งถ้าเป็นงานแผ่นพื้นชั้นล่างถูกเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตจะต้องพิจารณาก่อนว่าเมื่องานแผ่นพื้นชั้นล่างถูกเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตแล้วส่งผลกระทบต่อให้งานใดๆผลิตเสร็จเกินกำหนดเวลาส่งงานหรือไม่ ซึ่งถ้ามีงานใดๆผลิตเสร็จเกินกำหนดเวลาส่งงานก็จะย้อนกลับมาให้งานซ้อนทับถูกเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตแทน แต่ถ้าไม่มี งานแผ่นพื้นชั้นล่างก็จะถูกเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตแล้วพิจารณาขั้นตอนการผลิตของงานซ้อนทับขั้นตอนถัดไป และจะพิจารณาในลักษณะเดียวกันนี้จนกระทั่งขั้นตอนการผลิตที่ 5 ที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติมว่า เวลาเสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานซ้อนทับเกินเวลาเสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนการบ่มของงานแผ่นพื้นชั้นล่างหรือไม่ ซึ่งถ้าหากมีค่ามากกว่าก็จะทำให้งานแผ่นพื้นชั้นล่างต้องใช้ระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นเพื่อให้งานซ้อนทับสิ้นสุดการผลิตภายในระยะเวลาการบ่มของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง โดยจะส่งผลให้ขั้นตอนการผลิตที่ 4 และ ขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานแผ่นพื้นชั้นล่างต้องเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิต และยังคงส่งผลให้งานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้แม่แบบเดียวกันนี้ในการผลิตต้องเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตออกไปด้วยเช่นกัน จากนั้นจะจัดตารางการผลิตโดยพิจารณาการใช้ทรัพยากรร่วมกันของงานทั้งหมด ซึ่งถ้าไม่มีงานใดที่ผลิตเสร็จเกินกำหนดเวลาส่งงานก็จะสรุปได้ว่า การผลิตสามารถผลิตงานซ้อนทับบนงานแผ่นพื้นชั้นล่างนั้นได้โดยวิธีการทั้งหมดสามารถแสดงขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

- 1: procedure Double Layer Job Finding
- 2: Notations
- 3: T_k : Time remaining of mold before due date
- 4:
- 5: $BaseJobSequence_i$ Base Job Sequence
- 6: double layer job I 0

```

7:  for each  $i$  do
8:      if  $BaseJobSequence_i$  's formula = 1 then
9:          break
10:      elseif  $BaseJobSequence_i$  's formula = 2
          and  $T_k < 10$  then
11:          break
12:      else
13:          assign starting time of double layer job
14:          Job Scheduling
15:          if feasible then
16:               $I = I + 1$ 
17: Return

```

3. การเลือกสูตรการผลิต

จากวิธีการหาจำนวนงานซ้อนทับดังกล่าวข้างต้น ซึ่งพิจารณาลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างสองวิธี จะเลือกวิธีที่ได้จำนวนงานซ้อนทับที่มากที่สุด ซึ่งในหัวข้อนี้จะทำให้งานซ้อนทับทั้งหมดมีต้นทุนวัตถุดิบรวมน้อยที่สุดด้วยการเลือกสูตรการผลิตที่เหมาะสม โดยจะแก้ปัญหาด้วย 2 วิธีการ คือ วิธีการแรกจะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิธีการที่สองจะสร้างวิธีการทางฮิวริสติก

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เซต (Sets)

$= J \{1, 2, \dots, I\}$ เซตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง
 $= L \{1, 2, \dots, L\}$ เซตของงานซ้อนทับ
 $= J \{1, 2, \dots, 5\}$ เซตของขั้นตอนการผลิต
 $= F \{1, 2, \dots, F\}$ เซตของสูตรการผลิต

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variables)

$$X_{ifj} = \begin{cases} 1 & \text{ถ้างานซ้อนงาน } i \in L \text{ เลือกสูตรการผลิต } f \in F \text{ และผลิตซ้อนทับบนงานแผ่นพื้นชั้นล่าง } i \in J \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$S_{ij} = \text{เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง } i \in J \text{ ในขั้นตอนการผลิต } j \in J$$

S'_{ij} = เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับ $ie\mathcal{L}$
ในขั้นตอนการผลิต $j\in\mathcal{J}$

B_i = เวลาเสร็จสิ้นการผลิตของงานแผ่นพื้น
ชั้นล่าง $ie\mathcal{J}$

W_{ij} $\{0,1\}$, $ie\mathcal{J}, j\in\mathcal{J}$

V_{iji} $\{0,1\}$, $ie\mathcal{L}, j\in\mathcal{J}, ie\mathcal{J}$

U_{ij} $\{0,1\}$, $ie\mathcal{L}, j\in\mathcal{J}$

ค่าพารามิเตอร์ (Parameters)

P_j = ระยะเวลาการผลิตของขั้นตอนการผลิต
 $j\in\mathcal{J}$ สำหรับการผลิตแผ่นพื้นชั้นล่าง

P'_j = ระยะเวลาการผลิตของขั้นตอนการผลิต
 $j\in\mathcal{J}$ สำหรับการผลิตซ้อนทับ

P_{3f} = ระยะเวลาการผลิตของขั้นตอนการป่ม
ที่ขึ้นอยู่กับสูตรการผลิต $f\in\mathcal{F}$

C_f = ต้นทุนวัตถุดิบที่มีมูลค่าขึ้นอยู่กับสูตรการผลิต
 $f\in\mathcal{F}$ (หน่วย)

$form_i$ = ระยะเวลาในการป่มของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง $ie\mathcal{J}$

$mold_i$ = แม่แบบที่งานแผ่นพื้นชั้นล่าง $ie\mathcal{J}$ ใช้ในการผลิต

D = เวลาส่งงาน

M = เลขจำนวนมากที่กำหนดให้มีค่าเท่ากับเวลา
ส่งงาน

แบบจำลอง (Model)

สมการวัตถุประสงค์ (Objective Function)

$$\min \sum_{i\in\mathcal{L}} \sum_{f\in\mathcal{F}} \sum_{ie\mathcal{J}} X_{if i} C_f \quad (1)$$

สมการข้อจำกัด (Constraint Function)

$$S_{i2} \geq S_{i1} + P_1, \forall ie\mathcal{J} \quad (2)$$

$$S_{i3} = S_{i2} + P_2, \forall ie\mathcal{J} \quad (3)$$

$$S_{i4} \geq S_{i3} + form_i, \forall ie\mathcal{J} \quad (4)$$

$$S_{i5} \geq S_{i4} + P_4, \forall ie\mathcal{J} \quad (5)$$

$$B_i = S_{i5} + P_5, \forall ie\mathcal{J} \quad (6)$$

$$B_i - S'_{i'1} \leq M \cdot (mold_i - mold_{i'}) \quad (7)$$

$, \forall i, i' \in \mathcal{J}, i' > i, mold_i = mold_{i'}$

$$S_{ij} + P_j - S'_{i'j} \leq M \cdot W_{ij} \quad (8)$$

$, \forall i, i' \in \mathcal{J}, \forall j \in \mathcal{J}, j \neq 2, 3, i \neq i'$

$$-S_{ij} + P_j + S'_{i'j} \leq M \cdot (1 - W_{ij}) \quad (9)$$

$, \forall i, i' \in \mathcal{J}, \forall j \in \mathcal{J}, j \neq 2, 3, i \neq i'$

$$1 + S_{i2} + P_2 - S'_{i'2} \leq M \cdot W_{i2} \quad (10)$$

$, \forall i, i' \in \mathcal{J}, i \neq i'$

$$1 - S_{i2} + P_2 + S'_{i'2} \leq M \cdot (1 - W_{i2}) \quad (11)$$

$, \forall i, i' \in \mathcal{J}, i \neq i'$

$$B_i \leq D, \forall ie\mathcal{J} \quad (12)$$

$$\sum_{f\in\mathcal{F}} \sum_{ie\mathcal{J}} X_{if i} = 1, \forall ie\mathcal{L} \quad (13)$$

$$\sum_{ie\mathcal{L}} \sum_{f\in\mathcal{F}} X_{if i} \leq 1, \forall ie\mathcal{J} \quad (14)$$

$$S'_{i2} \geq S'_{i1} + P'_1, \forall ie\mathcal{L} \quad (15)$$

$$S'_{i3} = S'_{i2} + P'_2, \forall ie\mathcal{L} \quad (16)$$

$$S'_{i4} \geq S'_{i3} + \sum_{f\in\mathcal{F}} \sum_{ie\mathcal{J}} X_{if i} P_{3f}, \forall ie\mathcal{L} \quad (17)$$

$$S'_{i5} \geq S'_{i4} + P'_4, \forall ie\mathcal{L} \quad (18)$$

$$(1 - \sum_{f\in\mathcal{F}} X_{if i}) \cdot M \geq S_{i3} + 12 - S'_{i1} \quad (19)$$

$, \forall ie\mathcal{L}, \forall ie\mathcal{J}$

$$(1 - \sum_{f\in\mathcal{F}} X_{if i}) \cdot M \geq S'_{i5} + P'_5 - S_{i4} \quad (20)$$

$, \forall ie\mathcal{L}, \forall ie\mathcal{J}$

$$S_{ij} + P_j - S'_{ij} \leq M \cdot V_{iji} \quad (21)$$

$, \forall ie\mathcal{J}, \forall ie\mathcal{L}, \forall j \in \mathcal{J}, j \neq 2, 3$

$$-S_{ij} + P'_j + S'_{ij} \leq M \cdot (1 - V_{iji}) \quad (22)$$

$, \forall ie\mathcal{J}, \forall ie\mathcal{L}, \forall j \in \mathcal{J}, j \neq 2, 3$

$$1 + S_{i2} + P_2 - S'_{i2} \leq M \cdot V_{i2i} \quad (23)$$

$, \forall ie\mathcal{J}, \forall ie\mathcal{L}$

$$1 - S_{i2} + P'_2 + S'_{i2} \leq M \cdot (1 - V_{i2i}) \quad (24)$$

$, \forall ie\mathcal{J}, \forall ie\mathcal{L}$

$$S'_{ij} + P'_j - S'_{l'j} \leq M \cdot U_{ij} \\ , \forall l, l' \in \mathcal{L}, \forall j \in \mathcal{J}, j \neq 2, 3, l' \neq l \quad (25)$$

$$-S'_{ij} + P'_j + S'_{l'j} \leq M \cdot (1 - U_{ij}) \\ , \forall l, l' \in \mathcal{L}, \forall j \in \mathcal{J}, j \neq 2, 3, l' \neq l \quad (26)$$

$$1 + S'_{i2} + P'_2 - S'_{l'2} \leq M \cdot U_{i2} \\ , \forall l, l' \in \mathcal{L}, l' \neq l \quad (27)$$

$$1 - S'_{i2} + P'_2 + S'_{l'2} \leq M \cdot (1 - U_{i2}) \\ , \forall l, l' \in \mathcal{L}, l' \neq l \quad (28)$$

$$X_{lfi} \in \{0,1\} \quad , \forall l \in \mathcal{L}, \forall f \in \mathcal{F}, \forall i \in \mathcal{I} \quad (29)$$

$$W_{ij} \in \{0,1\} \quad , \forall i \in \mathcal{I}, \forall j \in \mathcal{J} \quad (30)$$

$$V_{lji} \in \{0,1\} \quad , \forall l \in \mathcal{L}, \forall j \in \mathcal{J}, \forall i \in \mathcal{I} \quad (31)$$

$$U_{ij} \in \{0,1\} \quad , \forall l \in \mathcal{L}, \forall j \in \mathcal{J} \quad (32)$$

$$S_{ij} \geq 0 \quad , \forall i \in \mathcal{I}, \forall j \in \mathcal{J} \quad (33)$$

$$S'_{ij} \geq 0 \quad , \forall l \in \mathcal{L}, \forall j \in \mathcal{J} \quad (34)$$

$$B_i \geq 0 \quad , \forall i \in \mathcal{I} \quad (35)$$

สมการทางคณิตศาสตร์นี้มีวัตถุประสงค์ (1) ให้ต้นทุนวัตถุดิบรวมทั้งหมดของงานซ้อนทับมีค่าน้อยที่สุดภายใต้สมการข้อจำกัดต่างๆ คือในการผลิตแผ่นพื้นชั้นล่างการผลิตจะต้องผลิตไปตามลำดับขั้นตอนที่ขั้นตอนการผลิตถัดไปสามารถเริ่มต้นการผลิตได้ก็ต่อเมื่อเสร็จสิ้นการผลิตในขั้นตอนการผลิตก่อนหน้า (2)-(5) ยกเว้นในขั้นตอนการผลิตที่ 3 คือ ขั้นตอนการบ่ม ที่ต้องเริ่มต้นการผลิตทันทีเมื่อขั้นตอนการผลิตก่อนหน้า คือ ขั้นตอนการหล่อเสร็จสิ้น (3) และในขั้นตอนการผลิตนี้จะใช้ระยะเวลาในการผลิตไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับสูตรการผลิตที่ใช้ (4) และสามารถกำหนดเวลาเสร็จสิ้นการผลิตของแต่ละงานที่ใช้แม่แบบใดแม่แบบหนึ่งในการผลิตได้ (6) โดยที่งานถัดไปในแม่แบบนั้นจะเริ่มต้นการผลิตได้ก็ต่อเมื่องานก่อนหน้าในแม่แบบนั้นสิ้นสุดการผลิตแล้วเท่านั้น (7) นอกจากนี้ขั้นตอนการผลิตแต่ละขั้นตอน (ยกเว้นขั้นตอนที่ 3) จะต้องใช้ทรัพยากรร่วมกันทำให้เวลาในการผลิตของแต่ละขั้นตอนจะต้องไม่ซ้อนทับกัน (8)-(11) และในขั้นตอนที่ 2 ที่ทรัพยากรต้องพักอย่างน้อย 1 หน่วยสำหรับการล้าง

ทำความสะอาดก่อนที่จะเริ่มการผลิตงานถัดไปได้ (10)-(11) โดยในการผลิตนั้นงานทุกงานจะต้องผลิตเสร็จก่อนเวลาส่งงาน (12) สำหรับการผลิตที่มีการผลิตซ้อนทับนั้นจะพบว่างานที่ซ้อนทับสามารถเลือกสูตรการผลิตและงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่จะผลิตซ้อนทับได้เพียงหนึ่งเดียวเท่านั้น (13) ในขณะเดียวกันเมื่องานแผ่นพื้นชั้นล่างถูกเลือกให้มีการผลิตซ้อนทับก็สามารถเลือกงานที่จะผลิตซ้อนทับได้เพียงงานเดียวเช่นกัน (14) และการผลิตซ้อนทับยังคงต้องผลิตไปตามลำดับขั้นตอนการผลิตเช่นเดียวกันกับการผลิตแผ่นพื้นชั้นล่าง (15)-(18) แต่จะมีเงื่อนไขบางอย่างเพิ่มเติม คือ งานซ้อนทับจะเริ่มต้นการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 1 ได้ก็ต่อเมื่องานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ถูกซ้อนทับผลิตขั้นตอนการบ่มไปแล้วอย่างน้อย 12 หน่วย (19) และในการผลิตซ้อนทับเมื่องานซ้อนทับมีเวลาสิ้นสุดการผลิตมากกว่าเวลาเสร็จสิ้นการบ่มของงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ถูกซ้อนทับจะทำให้งานแผ่นพื้นชั้นล่างงานนั้นต้องขยายระยะเวลาในการบ่มออกไป ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อขั้นตอนการผลิตที่ 4 ของงานแผ่นพื้นชั้นล่างนั้นจะสามารถเริ่มต้นการผลิตได้หลังจากที่งานซ้อนทับผลิตเสร็จสิ้น (20) นอกจากนี้งานซ้อนทับยังคงต้องคำนึงถึงการใช้ทรัพยากรร่วมกันในแต่ละขั้นตอนการผลิต โดยจะต้องพิจารณาการใช้ทรัพยากรร่วมกันกับงานแผ่นพื้นชั้นล่าง (21)-(24) และกับงานซ้อนทับด้วยกัน (25)-(28) ซึ่งสมการข้อจำกัด (29)-(32) ที่ระบุให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่า 2 ค่า คือ 0 กับ 1 (Binary) และสมการข้อจำกัด (33)-(35) ที่ตัวแปรตัดสินใจต้องมีความมากกว่าหรือเท่ากับ 0 (Non-Negative)

3.2 วิธีการทางฮิวริสติก

จากวิธีการหาจำนวนงานซ้อนทับดังกล่าวข้างต้นซึ่งพิจารณาลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างสองวิธี จะเลือกคำตอบจากวิธีที่ได้จำนวนงานซ้อนทับที่มากที่สุดมาเป็นคำตอบตั้งต้น (Initial Solution) แต่ถ้าทั้งสองวิธีให้จำนวนงานซ้อนทับเท่ากันก็จะเลือกคำตอบจากวิธีที่ 1 เนื่องจากวิธีนี้เลือกงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้สูตรการผลิตที่มีระยะเวลาในการบ่มนานก่อน โดยจากหลักการที่ว่า ถ้างานซ้อนทับถูกจัดสรรให้กับงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้สูตรการผลิตที่มีระยะเวลาในการบ่มนาน ก็มีโอกาสมากขึ้นที่งานซ้อนทับนั้นจะสามารถใช้สูตรการผลิตที่มีระยะเวลาในการบ่มนาน คือ มีต้นทุนวัตถุดิบต่ำได้ด้วยเช่นกัน โดยคำตอบตั้งต้นจะระบุสูตรการผลิตของงานซ้อน

ทับซึ่งใช้สูตรการผลิตที่ 1 ทั้งหมด ระบุงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่งานซ้อนทับแต่ละงานใช้ในการผลิต และระบุตารางการผลิตที่จะพัฒนาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติกเพื่อให้ได้ต้นทุนวัตถุดิบรวมต่ำที่สุดซึ่งฮิวริสติกที่นำเสนอเริ่มต้นจากการให้งานซ้อนทับเลือกสูตรการผลิตใหม่ (Formula Selection) ที่มีต้นทุนวัตถุดิบต่ำลงโดยจะพิจารณางานซ้อนทับทุกงานตามลำดับ และในแต่ละครั้งที่งานซ้อนทับนั้นเปลี่ยนสูตรการผลิตจะต้องตรวจสอบการจัดตารางการผลิต (Job Scheduling) เพื่อให้ไม่มีการใช้ทรัพยากรซ้อนทับกัน และไม่มีงานใดที่เสร็จสิ้นการผลิตเกินกำหนดเวลาส่งงาน จากนั้นจะนำคำตอบที่ได้ไปพัฒนาสูตรการผลิต (Improvement) ด้วยการลดสูตรการผลิตของงานซ้อนทับงานหนึ่งลง 1 สูตร แล้วเพิ่มสูตรการผลิตของงานซ้อนทับงานอื่นๆ ขึ้น 1 สูตรทีละงานซึ่งหลังจากปรับสูตรการผลิต ทุกครั้งก็ต้องตรวจสอบการจัดตารางผลิต และถ้าได้ต้นทุนวัตถุดิบรวมที่ต่ำลงก็จะนำคำตอบใหม่ที่ได้แทนคำตอบเดิม โดยแสดงลำดับขั้นตอนของวิธีการฮิวริสติกดังนี้

Algorithm 1 Heuristics

- 1: Notations
- 2: S_b : Current best feasible solution
- 3:
- 4: Generate an initial feasible solution
- 5: $S_b \leftarrow \text{mulaSelection}(S_b)$
- 6: for each double layer job i do
- 7: s Improvement (s)
- 8: if s ' is better than S_b then
- 9: $S_b \leftarrow s$
- 10: else
- 11: Return S_b

จากลักษณะการผลิตซ้อนทับจะพบว่า ระยะเวลาการผลิตรวมจะขึ้นอยู่กับสูตรการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ถูกซ้อนทับ จากรูปที่ 2 แม้ว่างานซ้อนทับจะใช้สูตรการผลิตที่ 1 เหมือนกันแต่ถ้าสูตรการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่างต่างกันก็จะทำให้ระยะเวลาการผลิตรวมต่างกันด้วย นอกจากนี้เวลาการผลิตรวมยังขึ้นอยู่กับสูตรการผลิตของ

งานซ้อนทับ ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีงานแผ่นพื้นชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 2 ถ้างานซ้อนทับใช้สูตรการผลิตที่ 1 ระยะเวลาการผลิตรวมจะเท่ากับ 57 หน่วย ถ้างานซ้อนทับใช้สูตรการผลิตที่ 2 ระยะเวลาการผลิตรวมจะเท่ากับ 69 หน่วย เป็นต้นงานวิจัยนี้อ้างอิงข้อมูลระยะเวลาการผลิตและต้นทุนการผลิตของแต่ละขั้นตอนการผลิตและสูตรการผลิตต่างๆ จากงานวิจัยของ(1)โดยสูตรการผลิตที่ 1 ใช้ระยะเวลาการบ่ม 24 หน่วยและมีต้นทุนวัตถุดิบ 20 หน่วย สูตรการผลิตที่ 2 ใช้ระยะเวลาการบ่ม 36 หน่วยและมีต้นทุนวัตถุดิบ 15 หน่วย สูตรการผลิตที่ 3 ใช้ระยะเวลาการบ่ม 48 หน่วยและมีต้นทุนวัตถุดิบ 13 หน่วยสูตรการผลิตที่ 4 ใช้ระยะเวลาการบ่ม 72 หน่วยและมีต้นทุนวัตถุดิบ 8 หน่วยและสูตรการผลิตที่ 5 ใช้ระยะเวลาการบ่ม 96 หน่วยและมีต้นทุนวัตถุดิบ 5 หน่วยและในขั้นตอนการผลิตที่ 1 ของงานซ้อนทับจะใช้ระยะเวลาการผลิตน้อยกว่างานแผ่นพื้นชั้นล่าง 1 หน่วย ดังนั้นขั้นตอนการผลิตที่ 1 ของงานซ้อนทับจะใช้ระยะเวลาการผลิต 2 หน่วย

3.2.1 การพัฒนาเลือกสูตรการผลิต

(1) การเลือกสูตรการผลิต

จากคำตอบเริ่มต้นที่งานซ้อนทับทุกงานใช้สูตรการผลิตที่ 1 ที่มีระยะเวลาในการบ่มสั้นที่สุดแต่ก็มีต้นทุนวัตถุดิบสูงที่สุด ซึ่งวิธีการต่อจากนี้จะช่วยให้ต้นทุนวัตถุดิบรวมของงานซ้อนทับมีค่าน้อยลงด้วยการให้งานซ้อนทับเลือกสูตรการผลิตที่มีต้นทุนวัตถุดิบต่ำลง โดยการเลือกสูตรการผลิตจะพิจารณาตามค่าความถ่วง (Transferring Weight) ซึ่งการเลือกสูตรการผลิตจะพิจารณางานซ้อนทับทีละงานโดยเปลี่ยนไปใช้สูตรการผลิตที่มีค่าความถ่วงมาก จากนั้นให้ตรวจสอบว่า มีระยะเวลาที่เหลือก่อนกำหนดเวลาส่งงานเพียงพอที่จะให้เปลี่ยนสูตรการผลิตหรือไม่ ซึ่งถ้ามีไม่มากพอก็จะพิจารณาสูตรการผลิตที่มีค่าความถ่วงมากถัดไป แต่ถ้ามีมากพอก็จะนำไปจัดตารางการผลิตที่พิจารณาการใช้ทรัพยากรร่วมกันของงานทุกงาน ซึ่งถ้าทุกงานไม่สามารถผลิตเสร็จทันกำหนดส่งงานก็ให้พิจารณาสูตรการผลิตที่มีค่าความถ่วงมากถัดไป แต่ถ้าผลิตเสร็จทันกำหนดส่งงานครบทุกงาน งานซ้อนทับนั้นก็ถูกเปลี่ยนสูตรการผลิต และคำนวณระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงานในแต่ละแม่แบบใหม่โดย

คำนวณจากเวลาส่งงานหักออกด้วยเวลาเสร็จสิ้นการผลิต ขั้นตอนการผลิตสุดท้ายของงานสุดท้ายในแม่แบบนั้นจากนั้นจะพิจารณางานซ้อนทับงานถัดไปในลักษณะเดียวกันนี้จนกระทั่งงานซ้อนทับงานสุดท้าย โดยลำดับขั้นตอนต่างๆของวิธีการนี้ เป็นดังนี้

1: **procedure** FormulaSelection (*s*)

s : current solution

2: **Notations**

3: T_k :Time remaining of mold *k* before due date

4: W_{ij} : Transferring weights for moving from formula *i* to formula *j*

5: $P(i)$: Processing time that select formula *i*

6:

7: for each double layer job *l* do

8: *i* ← current job formula

9:Find formula $j' >$ with largest $W'_{ij'}$

10: if no such formula exists then

11: **break**

12: **else**

13: if $P(i) + T_k < P(j')$ then

14: $W'_{ij'} \leftarrow 0$

15: **break**

16: **else**

17: *i* ← j'

18: JobScheduling

19: if feasible then

20: *s* ← s'

21: Compute all time remaining T_k

22: **else**

23: $W'_{ij'} \leftarrow 0$

24: $W'_{ij'} \leftarrow W_{ij'}$

25: Return new formula assignment s'

ค่าความถ่วงคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างต้นทุนวัตถุดิบที่ลดลงกับระยะเวลาการผลิตรวมที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ในการเปลี่ยนสูตรการผลิตของงานซ้อนทับจากสูตรการผลิตที่ 1 เป็นสูตรการผลิตที่ 2 โดยมีงานแผ่นพื้นชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 2 จะได้ค่าความถ่วงเท่ากับ $(20-15) / (69-57) = 0.417$ หรือถ้าเปลี่ยนจากสูตรการผลิตที่ 1 เป็นสูตรการผลิตที่ 3 จะได้ค่าความถ่วงเท่ากับ $(20-13) / (81-57) = 0.292$ หรือถ้าเปลี่ยนจากสูตรการผลิตที่ 1 เป็นสูตรการผลิตที่ 4 จะได้ค่าความถ่วงเท่ากับ $(20-8) / (105-57) = 0.25$ และถ้าเปลี่ยนจากสูตรการผลิตที่ 1 เป็นสูตรการผลิตที่ 5 จะได้ค่าความถ่วงเท่ากับ $(20-5) / (129-57) = 0.208$ เป็นต้น อย่างไรก็ตามจะมีบางกรณีที่ดินทุนวัตถุดิบสามารถลดลงได้โดยที่ระยะเวลาในการผลิตไม่ได้เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ค่าความถ่วงมีค่าประมาณไม่ได้ (Infinity)ซึ่งจะพบในกรณีที่งานแผ่นพื้นชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 4 และสูตรการผลิตที่ 5 เท่านั้น ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่งานแผ่นพื้นชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 4 และงานซ้อนทับใช้สูตรการผลิตที่ 1สามารถคำนวณหาค่าความถ่วงได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งจะพบว่า งานซ้อนทับไม่สามารถเลือกสูตรการผลิตที่จะเปลี่ยนได้เนื่องจากค่าความถ่วงบางค่าไม่สามารถประเมินค่าได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับค่าความถ่วงที่มีค่าประมาณไม่ได้ โดยให้สูตรการผลิตที่ใช้ระยะเวลาในการป้อนานมีค่าความถ่วงสูงและสูตรการผลิตที่ใช้ระยะเวลาในการป้อนสั้นกว่ามีค่าความถ่วงรองลงมา ดังตารางที่ 2

ตารางที่1 ค่าความถ่วงเมื่องานแผ่นพื้นชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 4 และงานซ้อนทับใช้สูตรการผลิตที่ 1

สูตรการผลิตงานซ้อนทับ	2	3	4	5
1	∞	∞	0.545	0.326

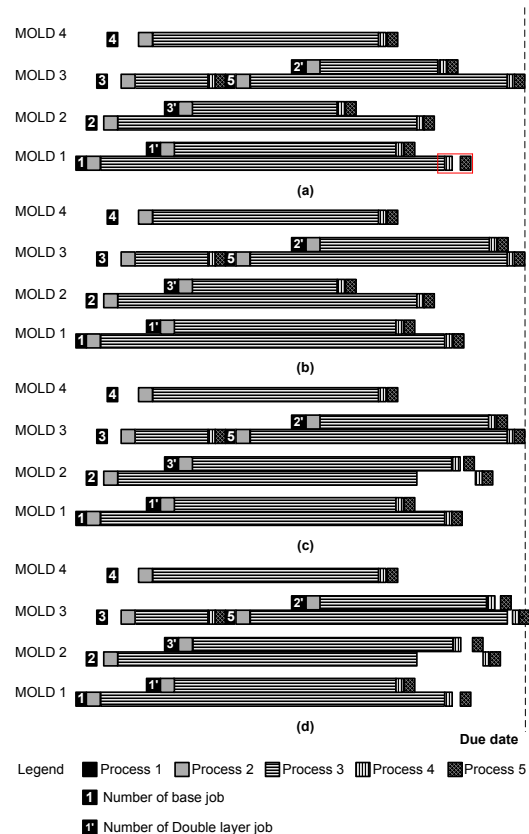
ตารางที่2 การปรับค่าความถ่วงเมื่องานแผ่นพื้นชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 4

สูตรการผลิตงานซ้อนทับ	2	3	4	5
1	0.900	1.000	0.5450	0.326

(2) การจัดตารางการผลิต

การจัดตารางการผลิตจะเป็นลักษณะการจัดตารางการผลิตเพียงบางส่วนเท่านั้น พิจารณาโดยเลื่อนขั้นตอนการผลิตที่ 4 และ 5 ของงานแผ่นพื้นชั้นล่างกลับเข้ามาเริ่มต้นการผลิตเร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้โดยไม่คำนึงถึงการใช้ทรัพยากรร่วมกัน จากนั้นทำการเปลี่ยนสูตรการผลิตของงานซ้อนทับและจัดตารางการผลิตอีกครั้งหนึ่งโดยพิจารณาการใช้ทรัพยากรร่วมกันวิธีการนี้กำหนดให้พิจารณาเฉพาะขั้นตอนการผลิตที่ 4 และขั้นตอนการผลิตที่ 5 เท่านั้น เนื่องจากการเลื่อนเวลาเริ่มต้นของขั้นตอนการผลิตอื่นๆ มีโอกาสทำให้งานซ้อนทับเป็นคำตอบที่เป็นไปได้สูง

จากรูปที่ 3 ยกตัวอย่างการจัดตารางการผลิตเมื่องานซ้อนทับงานที่ 2 เปลี่ยนสูตรการผลิต โดยเริ่มต้นให้งานซ้อนทับงานที่ 2 เพิ่มระยะเวลาในการบ่มซึ่งส่งผลให้เวลาเริ่มต้นการผลิตของขั้นตอนการผลิตที่ 4 และ 5 เปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 3(b) แต่จากรูปที่ 3(a) จะพบว่า ขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานแผ่นพื้นชั้นล่างงานที่ 1 ถูกเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตเนื่องจากการใช้ทรัพยากรซ้อนกันกับงานซ้อนทับงานที่ 2 ก่อนที่จะเปลี่ยนสูตรการผลิต ดังนั้นเมื่องานซ้อนทับงานที่ 2 เปลี่ยนสูตรการผลิตก็จะทำให้ไม่มีการใช้ทรัพยากรซ้อนกันกับงานแผ่นพื้นชั้นล่างงานที่ 1 จึงให้ขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานแผ่นพื้นชั้นล่างงานที่ 1 เริ่มต้นการผลิตหลังจากที่ขั้นตอนการผลิตที่ 4 เสร็จสิ้นดังรูปที่ 3(b) โดยการเลื่อนดังกล่าวจะทำให้งานซ้อนทับงานที่ 3 สามารถเปลี่ยนสูตรการผลิตที่ใช้ระยะเวลาในการบ่มนานขึ้นได้ดังรูปที่ 3(c) แต่ถ้าการเลื่อนดังกล่าวไม่ถูกเลื่อนกลับมา งานซ้อนทับงานที่ 3 ก็ไม่สามารถเปลี่ยนสูตรการผลิตได้เนื่องจากงานแผ่นพื้นชั้นล่างงานที่ 5 เสร็จสิ้นการผลิตเกินกำหนดเวลาส่งงานดังรูปที่ 3(d)



รูปที่ 3 ตัวอย่างการจัดตารางการผลิต

3.2.2 การพัฒนาสูตรการผลิต จากวิธีการเปลี่ยนสูตรการผลิตดังกล่าวจะเห็นได้ว่าพิจารณาการเปลี่ยนสูตรการผลิตเพียงครั้งละ 1 งานเท่านั้น ซึ่งในบางกรณีการทำงานหนึ่งเปลี่ยนสูตรการผลิตอาจไปขัดขวางไม่ให้งานอื่นๆ เปลี่ยนสูตรการผลิต ดังนั้นวิธีการนี้จึงพิจารณาให้ลดสูตรการผลิตงานซ้อนทับงานหนึ่งลง 1 สูตรการผลิต และเพิ่มสูตรการผลิตให้กับงานซ้อนทับงานอื่นๆ ที่ละงานขึ้น 1 สูตรการผลิต ซึ่งหลังจากปรับสูตรการผลิตทุกครั้งก็ต้องจัดตารางการผลิตเพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ของสูตรการผลิตที่เปลี่ยนและเมื่อพิจารณาเพิ่มสูตรการผลิตให้กับงานซ้อนทับจนครบทุกงานแล้วให้เปรียบเทียบต้นทุนวัตถุดิบรวมใหม่ที่ได้ โดยถ้ามีค่าน้อยกว่าต้นทุนวัตถุดิบรวมเดิมก็จะแทนสูตรการผลิตเดิม และจะพิจารณา

ลดสูตรการผลิตงานถัดไป โดยจะพิจารณาลักษณะเดียวกันนี้ จนกระทั่งลดสูตรการผลิตงานซ้อนทับงานสุดท้ายจึงจะหยุดอีวิริสติกวิธีการนี้ซึ่งลำดับขั้นตอนต่างๆ ของวิธีการนี้เป็นดังนี้

1: procedure Improvement

s : current solution

2: Notations

3: s_b : Current best feasible solution

4: TC : Total cost

5:

6: for each double layer job l do

7: Modify s' by assigning a formula with one step shorter curing time to l

8: for each another double layer job l' do

9: Modify s' by assigning a formula with one step longer curing time to l'

10: Job Scheduling

11: if feasible then

12: $s \leftarrow s'$

13: if $TC' < TC$ then

14: $s_b \leftarrow s$

15: Return s_b

4. ผลการวิเคราะห์และอภิปราย

ในการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผล ได้กำหนดขนาดปัญหาออกเป็น 3 ขนาดตามจำนวนแม่แบบที่ใช้คือ 2 แม่แบบ 4 แม่แบบ และ 8 แม่แบบ ซึ่งมีทั้งหมด 38 ปัญหา โดยแต่ละปัญหามีจำนวนงานแผ่นพื้นชั้นล่างแตกต่างกัน และเมื่อใช้วิธีการหาจำนวนงานซ้อนทับที่มากที่สุด จะทำให้แต่ละปัญหาทราบถึงจำนวนงานซ้อนทับที่จะต้องผลิต โดยจะนำค่าต้นทุนวัตถุดิบรวมที่ได้จากอีวิริสติกในแต่ละปัญหา

มาเปรียบเทียบกับค่าต้นทุนวัตถุดิบรวมที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตารางที่ 3 แสดงผลลัพธ์สำหรับปัญหาที่มี 2 แม่แบบ พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถหาค่าที่ดีที่สุด (Optimal Solution) ได้ทุกปัญหาและอีวิริสติกที่นำเสนอก็สามารถหาค่าได้เท่ากับค่าที่ดีที่สุดทุกปัญหาด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดลองของปัญหาที่มี 2 แม่แบบ

Prob.	# base jobs	# double layer jobs	Math model		Heuristics	
			Total Cost (Unit)	Run time (sec)	Total Cost (Unit)	Run time (sec)
1	3	3	31	0.02	31	0.63
2	4	3	34	0.01	34	0.66
3	5	3	46	0.02	46	0.68
4	6	3	60	0.03	60	0.03
5	7	2	40	0.03	40	0.02
6	8	8	115	71.40	115	2.57
7	9	8	118	0.28	118	2.47
8	10	6	87	0.27	87	2.00
9	11	4	52	0.09	52	1.33
10	12	4	68	0.31	68	0.95

สำหรับปัญหาที่มี 4 แม่แบบแสดงในตารางที่ 4 พบว่า มีจำนวน 3 ปัญหาจากทั้งหมด 14 ปัญหาที่ไม่สามารถหาค่าที่ดีที่สุดได้ แต่ 3 ปัญหาดังกล่าวก็สามารถพบค่าที่ดี (Best Found Solution) โดยอีวิริสติกที่นำเสนอ นั้นไม่สามารถหาค่าได้เท่ากับค่าที่ดีที่สุดหรือค่าที่ดีจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวน 4 ปัญหา โดยมีผลต่างไม่เกินร้อยละ 7.30 แต่อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบนั้น

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดลองของปัญหาที่มี 4 แม่แบบ

Prob.	# base jobs	# double layer jobs	Math model		Heuristics	
			Total Cost (Unit)	Runtime (sec)	Total Cost (Unit)	Runtime (sec)
11	6	5	44	0.05	44	0.92
12	7	5	49	0.34	49	1.42
13	8	6	82	1.25	82	2.46
14	9	5	74	1.00	74	1.79
15	10	5	81	0.09	81	1.58
16	12	1	20	0.02	20	0.02
17	13	2	40	0.09	40	0.02
18	14	1	20	0.02	20	0.02
19	14	13	(141)*	8hr	151	27.09
20	17	13	(177)*	8hr	177	27.96
21	19	12	(178)*	7533.21	191	39.43
22	2	9	144	523.40	153	15.45
23	24	5	72	1.34	74	4.04
24	26	3	60	0.42	60	0.69

(*) หมายถึง ค่าที่ได้นั้นไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุดแต่เป็นค่าที่ดีที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบ

สำหรับปัญหาที่มี 8 แม่แบบแสดงในตารางที่ 5 พบว่ามีเพียง 2 ปัญหาจากทั้งหมด 14 ปัญหาที่ได้ค่าที่ดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า มี 3 ปัญหาที่ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งกำหนดเวลาในการค้นหาคำตอบไว้ 8 ชั่วโมงไม่สามารถหาคำตอบได้เลย (No Feasible Solutions) โดยฮิวริสติกที่นำเสนอมี 2 ปัญหาที่สามารถหาคำตอบได้ดีกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยดีกว่ามากที่สุดถึงร้อยละ 17.54 อย่างไรก็ตามในบางปัญหาฮิวริสติกก็หาคำตอบได้แย่กว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมีผลต่างมากที่สุดไม่เกินร้อยละ 17

ตารางที่ 5 แสดงผลการทดลองของปัญหาที่มี 8 แม่แบบ

Prob.	# base jobs	# double layer jobs	Math model		Heuristics	
			Total Cost (Unit)	Runtime (sec)	Total Cost (Unit)	Runtime (sec)
25	10	9	(144)*	12559.05	94	10.00
26	12	8	(93)*	8808.10	93	14.38
27	14	7	(97)*	8271.91	99	10.45
28	16	3	43	1763.87	46	2.03
29	18	4	(61)*	8hr	58	4.90
30	20	2	(30)*	8hr	35	3.45
31	26	1	(20)*	8hr	20	0.02
32	25	19	-	8hr	309	414.56
33	28	17	(214)*	8hr	241	230.23
34	32	11	(187)*	8hr	192	77.87
35	36	12	-	8hr	228	113.02
36	41	9	-	8hr	163	64.35
37	45	4	(54)*	8hr	54	21.65
38	49	1	13	55.04	13	1.41

5. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาปัญหาการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่อุตสาหกรรมการผลิตนี้เพิ่มกำลังการผลิตด้วย วิธีการผลิตซ้อนทับ แต่ยังไม่มีการที่ดีในการเพิ่มกำลังการผลิตให้ได้มากที่สุดและให้มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดด้วย โดยงานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการฮิวริสติกที่จะหาจำนวนงานซ้อนทับให้ได้มากที่สุด และเลือกสูตรการผลิตให้กับงานซ้อนทับเพื่อให้ต้นทุนวัตถุดิบรวมมีค่าต่ำที่สุด โดยเปรียบเทียบต้นทุนวัตถุดิบรวมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อย่างไรก็ตามจะพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความเหมาะสมที่นำมาใช้แก้ปัญหาการผลิตที่มี 2 แม่แบบ และ 4 แม่แบบที่มีจำนวนงานซ้อนทับน้อยกว่า 10 งาน ส่วนปัญหาที่เหลือที่มีขนาดใหญ่กว่าจะพบว่า ฮิวริสติกมีความเหมาะสมมากกว่าเนื่องจากระยะเวลาในการค้นหาคำตอบที่สมเหตุสมผลกับต้นทุนวัตถุดิบรวมที่ได้ซึ่งแตกต่างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่เกินร้อยละ 17

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Tharmmaphornphilas W, Suranpitak N. Formula Selection and Scheduling for Precast Concrete Production. Submitted to International Journal of Production Economics (IJPE). 2012.
- [2] Leu SS, Hwang ST. Optimal repetitive scheduling model with shareable resource constraint. Journal of Construction Engineering and Management. 2001;127: 270-280.
- [3] Leu SS, Hwang ST. GA-based resource-constrained flow-shop scheduling model for mixed precast production. Automation in Construction. 2002;11: 439-452.
- [4] Benjaoran V, Dawood N, Hobbs B. Flowshop scheduling model for bespoke precast concrete production planning. Construction Management and Economics. 2005;23: 93-105.
- [5] Grabowski J, Pempera, .Sequencing of jobs in some production system. European Journal of Operational Research. 2000;125: 535-550.
- [6] Ko C, Wang S. GA-based decision support systems for precast production planning. Automation in Construction. 2010;19: 907-916.
- [7] Grigoriev A, Sviridenko M, Uetz M. Machine scheduling with resource dependent processing times. Mathematical Programming B. 2007;110: 209-228.
- [8] Ruiz-Torres AJ, Lopez FJ, Ho JC. Scheduling uniform parallel machines subject to a secondary resource to minimize the number of tardy jobs. European Journal of Operational Research. 2007;179: 302-315.
- [9] Kellerer H. An approximation algorithm for identical parallel machines scheduling with resource dependent processing times. Operations Research Letters. 2008;36: 157-159.
- [10] Su L, Lien C. Scheduling parallel machines with resource-dependent processing times. International Journal Production Economics. 2009;117: 256-266.

