

จำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อการค้นหาปัจจัยแบบไม่ต่อเนื่องที่มีความสำคัญต่อสายการผลิตโดยใช้วิธีโดเมนความถี่

Computer Simulation for Finding Important Discrete Factor in Production Line Using a Frequency Domain Method

วฐา มินเสน* และ พรเทพ อนุสรณิศาร

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

*E-mail: watham@hotmail.com

บทคัดย่อ

การคัดเลือกปัจจัยด้วยวิธีโดเมนความถี่ เป็นการจำลองสถานการณ์โดยสามารถปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยทุกปัจจัยที่ทำการศึกษาระหว่างการรันการจำลองสถานการณ์ โดยค่าปัจจัยที่เปลี่ยนระหว่างการรันจะถูกกำหนดจากคลื่นความถี่ที่ไม่ซ้ำกัน ทำให้ค่าแต่ละปัจจัยจะแกว่งค่าไปตามคลื่นความถี่ที่กำหนดนั้น ถ้าปัจจัยตัวใดมีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง คลื่นความถี่ที่กำหนดให้ปัจจัยดังกล่าวก็จะส่งผลไปสู่ผลตอบสนองด้วย งานวิจัยฉบับนี้แสดงให้เห็นว่าการคัดเลือกปัจจัยด้วยวิธีโดเมนความถี่สามารถคัดเลือกปัจจัยแบบไม่ต่อเนื่อง โดยนำเสนอผ่านการผลิตแบบสายการประกอบที่มีจำนวนปัจจัยเป็นสถานการณ์ประกอบจำนวน 10 สถานี และใช้จำนวนรันการจำลองสถานการณ์จำนวน 512 ครั้ง ผลสรุปก็แสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้สามารถคัดเลือกปัจจัยที่มีความสำคัญต่อผลตอบสนองที่สนใจศึกษาได้ โดยสามารถตรวจสอบได้ทั้งอิทธิพลของหลักของปัจจัย อิทธิพลร่วมของปัจจัย และอิทธิพลของพหุนามกำลัง 2 ของปัจจัย

คำสำคัญ: การคัดเลือกปัจจัย, โดเมนความถี่, การจำลองสถานการณ์

Abstract

A frequency domain method for factor screening is a simulation model. It is run with input factors that are varied during a run according to sinusoidal oscillations. Different frequencies during a run are assigned to each factor. If the simulation response is sensitive to changes in a particular factor, then oscillating of this factor induces oscillations in the response. This paper presents Frequency Domain Method can find important discrete factors. The methodology is illustrated on a assembly line production with 10 assembly machine stations and simulation runs 512 run length. The result of this approach, important main effect, interaction effect and quadratic term were found in the model.

Key Words: Factor Screening, Frequency Domain, Simulation

1. คำนำ

ในปัจจุบันการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น เนื่องจากมีความสะดวกในการใช้งาน โดยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์สามารถปรับเปลี่ยนจำนวนปัจจัย หรือปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยที่ศึกษาได้โดยไม่ต้องไปทำในระบบจริง ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์สามารถนำไปใช้ตัดสินใจดำเนินการอย่างใดอย่างหนึ่งต่องานเพื่อนำไปใช้ปฏิบัติจริงได้

อย่างไรก็ตามระบบงานที่มีความซับซ้อนมาก ถ้าใช้วิธีการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์โดยตรงเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของระบบ (Optimization) พบว่ามีอุปสรรคในการประมวลผลแบบจำลองสถานการณ์ ทั้งนี้เนื่องจากในระบบที่ซับซ้อนมากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ต้องมีจำนวนปัจจัย (Factor) ที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก ซึ่งเป็นสาเหตุให้การค้นหาค่าที่เหมาะสมของระบบใช้เวลาประมวลผลนานกว่าจะได้คำตอบที่ต้องการ

จริงๆ แล้วระบบงานที่มีความซับซ้อนและมีปัจจัยอยู่ในระบบเป็นจำนวนมาก ปัจจัยเหล่านั้นอาจมีเพียงปัจจัยสำคัญไม่กี่ตัวที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง (Response) ดังนั้นการหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองของระบบเพื่อลดขนาดของปัญหา จะทำให้ลดเวลาในการวิเคราะห์หรือหาคำตอบที่เหมาะสมของงานได้ และยังเพิ่มความสะดวกในการนำตัวแบบ (Model) ไปใช้ เนื่องจาก ระบบที่มีความซับซ้อนจะถูกลดขนาดความซับซ้อนลง ทำให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ โดยวิธีการดังกล่าวเรียกว่า การคัดเลือกปัจจัย (Factor Screening)

วิธีทั่วไปในการคัดเลือกปัจจัยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k (Two-Level Factorial) โดยเทคนิคนี้กำหนดค่าคงที่ให้กับปัจจัยแล้ว รันการจำลองสถานการณ์ (Simulation Run) และจะเปลี่ยนค่าปัจจัยเพื่อรันการจำลองตามจำนวน 2^k ดังนั้นการใช้เทคนิคดังกล่าวนี้ จำเป็นต้องรันการจำลองสถานการณ์หลายครั้ง เช่น ถ้ามีจำนวนปัจจัย 20 ปัจจัย จะต้องรันการจำลองสถานการณ์จำนวน $2^{20} = 1,048,576$ รอบ และในแต่ละรันการจำลอง

สถานการณ์ถ้าทำซ้ำ (Replication) 30 รอบ ก็จะพบว่าต้องรันการจำลองสถานการณ์จำนวนทั้งสิ้น 31,457,280 รอบ และถ้าเป็นปัจจัยแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Factor) และต้องการจำลองสถานการณ์กับทุกระดับปัจจัย (Full-Level Factorial) จำนวนรอบการจำลองสถานการณ์ก็จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก จะเห็นว่าเป็นข้อเสียของวิธีการนี้ เพราะต้องใช้จำนวนครั้งในการรันจำนวนมาก และยิ่งมากขึ้นถ้าจำนวนปัจจัยมีจำนวนมาก

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการใช้เทคนิคการคัดเลือกปัจจัยด้วยวิธีโดเมนความถี่ (Frequency Domain Methodology: FDM) เมื่อปัจจัยของระบบเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง เทคนิคนี้สามารถทำการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยไปตามคลื่นความถี่ที่ถูกกำหนดในขณะรันการจำลองสถานการณ์ ถ้ามีจำนวนปัจจัย 20 ปัจจัยแล้วรันด้วยเทคนิคนี้ จะต้องการรันการจำลองสถานการณ์อย่างน้อย 1,588 รอบ เท่านั้นก็สามารถคัดเลือกปัจจัยได้ ในงานวิจัยนี้ใช้กรณีตัวอย่าง การผลิตแบบสายการประกอบ (Assembly Line) ที่มีจำนวนปัจจัย 10 ปัจจัย เพื่อทดสอบเทคนิคโดเมนความถี่ในการค้นหาปัจจัยแบบไม่ต่อเนื่องที่มีความสำคัญต่อสายการผลิต

2. การคัดเลือกปัจจัย (Factor Screening Method)

2.1. เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการทดลองเกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย เมื่อผู้วิจัยต้องการที่จะศึกษาถึงอิทธิพลร่วมที่มีอิทธิพลต่อตัวผลตอบสนองจากปัจจัยเหล่านั้น โดยปกติแต่ละปัจจัยสามารถเป็นได้ทั้งแบบต่อเนื่องหรือเป็นแบบไม่ต่อเนื่องก็ได้ แต่เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์แต่ละปัจจัย จะถูกแบ่งออกเพียง 2 ระดับ และในระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนด้วย สูง หรือ ต่ำ ของปัจจัยหนึ่งๆ ในกรณีที่ทำ การทดลองแบบ 1 ซ้ำ การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k จะมีข้อมูลที่เกิดขึ้นทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \dots \times 2 = 2^k$ เช่น มีปัจจัย 5 ปัจจัย ก็จะมีจำนวนข้อมูลทั้งสิ้น 32 ข้อมูล นั่นคือ ต้องทำการดำเนินงานการจำลองสถานการณ์

ด้วยคอมพิวเตอร์ทั้งสิ้น 32 ครั้ง เพื่อศึกษาปัจจัยว่าเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองหรือไม่

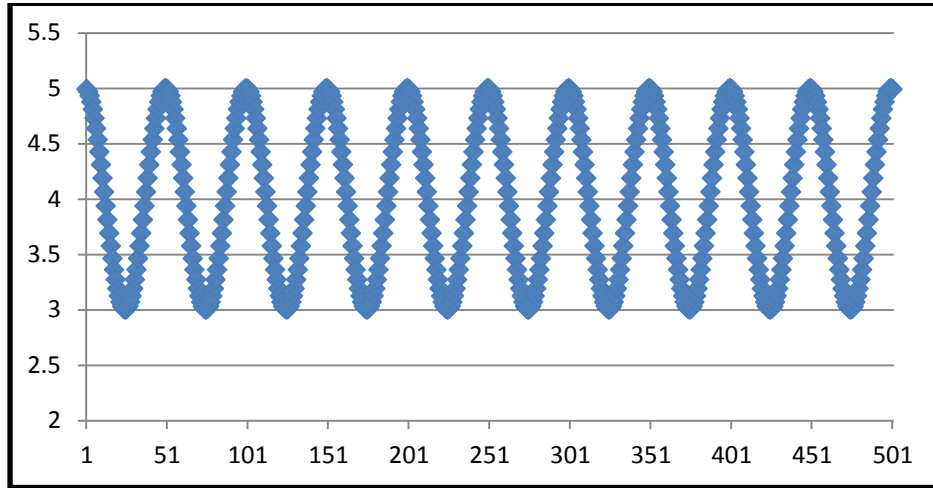
Trocene and Malone [1] ได้ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการวางแผนการทดลองแบบซูเปอร์เซตพหุเรดเดคไว้ดังนี้ วิธี SSD ใช้เมื่อผู้วิจัยต้องการศึกษาปัจจัยที่มีจำนวนมากกว่าจำนวนที่ต้องการการดำเนินงาน นั่นคือถ้าจำนวนปัจจัยที่ต้องการศึกษาเท่ากับ n และจำนวนที่ต้องการการดำเนินงานเท่ากับ m โดยที่ $m < n$ วิธีการ SSD เป็นวิธีการที่มีโครงสร้าง และได้ผลลัพธ์ รวมถึงความสามารถในการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองคล้ายกันกับวิธีการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล และวิธี Plackett-Burman โดยที่วิธีซูเปอร์เซตพหุเรดเดคนี้อาจพบปัญหาเกี่ยวกับอิทธิพลพัวพัน (Confounding) และความไม่เพียงพอในองศาความเป็นอิสระ (Degree of Freedom) ที่จะนำไปวิเคราะห์สมการถดถอย และ Hinkelmann and Kempthorne [2] ได้กล่าวถึงวิธีนี้ไว้ว่า ถึงแม้ว่าจะลดจำนวนการดำเนินงานลง วิธีการนี้ก็ไม่ทำให้สูญเสียข้อมูลสำคัญในการวิเคราะห์ปัจจัย แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จะเหมาะสมกับการมีปัจจัยที่ต้องศึกษาจำนวนมาก แต่ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อตัวแปรตอบสนองต้องมีจำนวนไม่กี่ตัวเท่านั้น โดยที่การคัดเลือกแผนแบบเพื่อนำไปใช้ในการดำเนินงานตามที่ต้องการนั้นมีเทคนิคด้วยกันหลายๆ วิธี เช่น แผนแบบคอมพิวเตอร์ค้นหา (Computer Search Design) หรือ แผนแบบฮาดามาร์ด-ไทป์ (Hadamard-Type Design) เป็นต้น Holcomb *et al.* [3] ได้อธิบายวิธีการของ SSD หลายโครงสร้างที่ถูกพัฒนาไว้ และได้เปรียบเทียบกับวิธีการคัดเลือกปัจจัยแบบอื่นๆ โดยให้ผลสรุปของการวิจัยว่า วิธีการ SSD ต้องถูกนำมาใช้อย่างระมัดระวัง เพราะผลลัพธ์ที่ได้อาจได้ผลดีหรือไม่ดีก็เป็นไปได้ทั้งสิ้น การตัดสินใจหลายอย่างในวิธีการนี้ที่ต้องเลือกอย่างเชี่ยวชาญจึงจะได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง ดังนั้น Holcomb *et al.* ได้ลงความเห็นไว้ว่า พวกเราไม่ให้ความเชื่อถือวิธีการที่พัฒนาแบบ SSD ในการใช้โดยทั่วไป

Wan *et al.* [4] ได้พัฒนาเทคนิคการแยกสองทาง

ตามลำดับถูกควบคุม (Controlled Sequential Bifurcation; CSB) เพื่อใช้คัดเลือกปัจจัยในการจำลองเหตุการณ์ที่ไม่ต่อเนื่อง (Discrete-Event Simulation) เป็นการพัฒนาต่อมาจากเทคนิคการแยกสองทางตามลำดับ (Sequential Bifurcation; SB) ที่นำเสนอโดย Bettonvil and Kleijnen [5] เทคนิคนี้ได้เพิ่มการทดสอบเป็นสองครั้งในแต่ละขั้นตอนของการแยกสองทาง เพื่อเพิ่มอำนาจการทดสอบของแต่ละกลุ่มปัจจัย และความคาดเคลื่อนชนิดที่ 1 (Type I Error) จะถูกควบคุม และเทคนิคนี้ใช้ได้แม้ว่าเงื่อนไขความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยจะไม่เท่ากันก็ตาม หลังจากนั้น Wan *et al.* [6] ได้พัฒนาเทคนิค CSB เพิ่มเติมโดยมีชื่อเรียกว่า CSB-X โดยเทคนิคนี้จะยอมผ่อนคลايข้อสมมติของปัจจัยหลักแต่ก็ยังให้ค่าความคาดเคลื่อนที่ใช้ควบคุมปัจจัยหลักเช่นเดียวกับเทคนิค CSB

2.2. การทดลองโดเมนความถี่

การทดลองโดเมนความถี่ (Frequency Domain Experiment: FDE) โดย Shruben and Cogliano [7] ได้นำเสนอไว้ในการคัดเลือกปัจจัยแบบต่อเนื่อง วิธี FDE สร้างขึ้นมาเพื่อคัดเลือกปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง การทดลองจะทำการจำลองสถานการณ์โดยกำหนดให้ปัจจัยที่เป็นแบบต่อเนื่องแปรเปลี่ยนค่าได้แบบคลื่นไซน์ระหว่างการรันการจำลองสถานการณ์ ดังรูปที่ 1 โดยที่แต่ละปัจจัยจะได้รับคลื่นความถี่ (Driving Frequency) แตกต่างกัน และถ้าผลตอบสนองเปลี่ยนไปในแต่ละเวลา โดยมีความสัมพันธ์กับปัจจัยที่ได้รับคลื่นความถี่ ซึ่งตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยเหล่านั้นได้ด้วยการเปลี่ยนผลตอบสนองที่อยู่ในรูปโดเมนเวลาไปเป็นผลตอบสนองโดเมนความถี่ แล้วตรวจสอบโดเมนความถี่ของผลตอบสนองกับคลื่นความถี่คลื่นไซน์ที่ปัจจัยได้รับ ถ้าปัจจัยที่มีอิทธิพลมากกับผลตอบสนอง ค่าของคลื่นความถี่คลื่นไซน์ที่ปัจจัยได้รับที่ระดับความถี่นั้นจะเด่นกว่าความถี่อื่นๆ นั่นคือ ความถี่คลื่นไซน์นั้นจะโคงมากในผลตอบสนอง และในทางกลับกันถ้าปัจจัยไม่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง ความถี่คลื่นไซน์ที่ปัจจัยได้รับนั้นจะไม่เด่น นั่นคือความถี่จะโคงเท่า ๆ กันกับระดับคลื่นไซน์อื่น



รูปที่ 1 แสดงค่าปัจจัยเปลี่ยนแปลงค่าตามคลื่นไซน์ ในช่วงเวลาที่ 1 ถึง 501 ในการรัน 1 ครั้ง

3. วิธีโดเมนความถี่ (Frequency Domain

Method)

FDE เป็นการวิเคราะห์สเปกตรัมของผลตอบสนองที่อยู่ในตัวแบบเชิงพหุนาม (Polynomial Model) เป็นฟังก์ชันที่ได้มาจากการจำลองสถานการณ์ผ่านปัจจัย การจำลองสถานการณ์ด้วยวิธีนี้ ต้องการจำนวนครั้งการทำ การจำลองระบบเพียง 2 ถึง 3 ครั้งเท่านั้นก็สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองหรือไม่ สิ่งสำคัญในการใช้โดเมนความถี่ในการคัดเลือกปัจจัยประกอบไปด้วย

3.1 รูปแบบปัญหา

FDE ใช้ประโยชน์ในระบบที่ไม่ทราบ ความสัมพันธ์ที่แน่นอน (Black Box) โดยความสัมพันธ์ในระบบจะถูกสมมติให้มีความสัมพันธ์แบบพหุนาม ลำดับที่ k เมื่อกำหนดให้ปัจจัยมีจำนวน p ตัว นั่นคือ x_1, x_2, \dots, x_p ผลตอบสนองกำหนดให้เป็นเป็นตัวแปร y ค่าคาดหวังของผลตอบสนองคือ $E(y)$ เป็นฟังก์ชันของทุกตัวแปร x ดังนั้นตัวแบบมีสมการพหุนามลำดับที่ k เป็นดังนี้

$$E(y) = \beta_0 + \beta_1\tau_1 + \beta_2\tau_2 + \dots + \beta_q\tau_q \quad (1)$$

หรือ
$$E(y) = \beta_0 + \sum_{j=1}^q \beta_j\tau_j$$

เมื่อ

$E(y)$ เป็นค่าคาดหวังของผลตอบสนอง

τ_j เป็นเทอมในพหุนาม ลำดับที่ k โดยผลรวมของเลขชี้กำลังของตัวแปรไม่มากกว่าค่า k ยกตัวอย่างเช่น ในเทอม $j = 1$ และถ้า $k = 5$ แล้ว $\tau_1 = x_1^2x_2^4$ จะไม่อยู่ในเทอมของสมการเพราะเลขชี้กำลัง $2+4$ มากกว่า 5 เป็นต้น

β_j เป็นสัมประสิทธิ์ของเทอม τ_j ถ้าเทอมของ τ_j ใดๆ ที่มีความหมายต่อฟังก์ชันค่าสัมประสิทธิ์ β_j จะไม่มีค่าเป็นศูนย์และ

q เป็นจำนวนเทอมทั้งหมดของฟังก์ชันผลตอบสนอง

3.2 การออกแบบการทดลองโดเมนความถี่

ขั้นตอนการออกแบบการทดลองมีด้วยกัน 4 ขั้นตอนคือ

1. การเลือกคลื่นความถี่ของปัจจัย

การเลือกคลื่นความถี่ (ω) ให้กับปัจจัยเพื่อทำการจำลองสถานการณ์นั้น ปัจจัยทุกตัวแปรต้องได้รับคลื่นความถี่ที่ค่าไม่เท่ากัน เมื่อกำหนดให้ n เป็นจำนวนข้อมูลที่ต้องการได้รับจากการทำการทดลอง การวิเคราะห์สเปกตรัมในโดเมนความถี่ของ ω ที่กำหนดให้จะไม่แม่นยำถ้ากำหนดให้ ω ที่มีค่าต่ำกว่า $1/n$ และค่าสูงสุดที่สามารถวิเคราะห์สเปกตรัมของความถี่ได้คือ 0.5 นั่นคือการกำหนดคลื่นความถี่จะอยู่ในช่วง $1/n \leq \omega \leq 0.5$ อย่างไรก็ตามการเลือก ω นอกจากกำหนดให้ค่าของ ω ไม่เท่ากันในแต่ละปัจจัยแล้ว ถ้ามีการพิจารณาในเทอมของอิทธิพลร่วม และในเทอมของพหุนาม ของปัจจัย เช่น พหุนามลำดับที่ 2 เป็นต้น การพิจารณาค่า ω เหล่านั้น

ต้องพิจารณาเพิ่มเติม Jacobson et al. [8] ได้ทำการศึกษาเพื่อกำหนดคลื่นความถี่ไม่ให้เกิดการใช้คลื่นความถี่ร่วมกันในการจำลองสถานการณ์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete-Event Simulations) โดยทำการศึกษาไว้ทั้งสิ้น 21 บัญชี ที่พหุนามลำดับ 2 ($k = 2$) และทำการศึกษา 11 บัญชี ที่พหุนามลำดับ 3 ($k = 3$)

2. การเลือกแอมพลิจูดของคลื่นความถี่

การกำหนดค่าแอมพลิจูดจะมีผลต่อขนาดของสเปกตรัมของผลตอบสนอง นั่นคือความสูงของสเปกตรัมของผลตอบสนองจะเป็นสัดส่วนกับความสูงของสเปกตรัมของปัจจัยที่ความถี่เดียวกัน ถ้ากำหนดแอมพลิจูดเล็กเกินไป ผลของการแกว่งก็ยากที่จะถูกตรวจสอบเจอ ถ้ากำหนดแอมพลิจูดใหญ่เกินไป ก็จะทำให้ค่าของปัจจัยออกนอกช่วงค่าของปัจจัยที่มันจะเป็นไปได้ Jacobson [9] ได้ทำการศึกษาการเลือกแอมพลิจูด โดยศึกษาอิทธิพลของแอมพลิจูด 3 อย่างคือ 1) ความเป็นไปได้ (Feasibility) 2) สิ่งรบกวน (Noise) 3) เทอมพหุนามที่ลำดับสูงๆ และได้สรุปผลไว้ว่า ถ้าต้องการให้ปัจจัยอยู่ในช่วงที่เป็นไปได้ และศึกษาในเทอมพหุนามที่ลำดับต่ำ แอมพลิจูดสามารถกำหนดอยู่ในช่วงน้อยๆ ได้ และถ้าต้องการลดผลกระทบที่เป็นสิ่งรบกวนก็ควรที่จะเลือกแอมพลิจูดที่กว้างเท่าที่จะเป็นไปได้ อย่างไรก็ตามอิทธิพลของแอมพลิจูดทั้ง 3 นั้นยากที่จะทำให้เป็นไปในทางเดียวกันได้ ถ้าจำเป็นต้องเรียงลำดับความสำคัญก็ควรพิจารณาที่ ความเป็นไปได้ของตัวปัจจัยเป็นอันดับแรก และผลกระทบของเทอมพหุนามที่ลำดับสูงๆ เป็นอันดับถัดมา และสุดท้ายจึงพิจารณาอิทธิพลของสิ่งรบกวน

การเลือกช่วงแอมพลิจูดของปัจจัย

$$\left\{ (x_1, x_2, \dots, x_p) \mid \text{Lower}_i \leq x_i \leq \text{Upper}_i \right\} \quad (2)$$

เมื่อ

Lower_i เป็นค่าที่ต่ำสุดของปัจจัย $i, i = 1, \dots, p$

Upper_i เป็นค่าที่สูงสุดของปัจจัย $i, i = 1, \dots, p$

แอมพลิจูดถูกเลือกในแต่ละปัจจัยในช่วงที่เป็นไปได้มีรูปแบบดังสมการต่อไปนี้

$$x_i(t) = 1/2(\text{Upper}_i + \text{Lower}_i) + 1/2(\text{Upper}_i - \text{Lower}_i) \cos 2\pi\omega_i t \quad (3)$$

อย่างไรก็ตามในการพิจารณากรณีที่ปัจจัยแบบไม่ต่อเนื่องจะมีสูตรแตกต่างไปจากสมการที่ (2) และ (3) ดังนี้คือ

$$P(x_i(t) = a_1) = 1/2 + 1/2 \cos 2\pi\omega_i t \quad (4)$$

นำค่าความน่าจะเป็นที่ได้มาเทียบกับตารางเพื่อกำหนดค่าให้ปัจจัย $x_i(t)$ เช่น

$P(x_i(t))$	ค่าที่ได้
0 - 0.49	a_1
0.50 - 1	a_2

3. การกำหนดความยาวของการทดลอง

จำนวนความยาวของการทดลองควรมีความยาวในการทดลองแต่ละรอบการรันที่เพียงพอ โดยกำหนดให้จำนวนความยาวในการรันควรให้คลื่นความถี่ที่มีค่าน้อยที่สุดที่กำหนดให้ปัจจัยเกินจำนวนรอบ 10 รอบ เช่นถ้ากำหนดคลื่นความถี่ 0.11 จำนวนรอบที่ทำให้คลื่นความถี่นี้เกิน 10 รอบคือ ความยาวการรัน 92 รัน เป็นต้น หรืออาจจะคำนวณจากสูตรได้ดังนี้

ให้พิจารณาว่าคลื่นความถี่ที่ต้องการตรวจสอบมีคลื่นความถี่ใดบ้าง เช่น ถ้ากำหนดให้มีปัจจัยที่ศึกษา 3 ปัจจัย โดยมีคลื่นความถี่หลักที่กำหนดให้แต่ละปัจจัยเป็น $\omega_1 = 0.11$, $\omega_2 = 0.18$ และ $\omega_3 = 0.43$ ตามลำดับ ดังนั้น เมื่อพิจารณาเทอมพหุนามลำดับที่ 2 จะพบว่าเกิดคลื่นความถี่ที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติมคือ $\{.22, .36, .14\}$ และเมื่อพิจารณาอิทธิพลรวมของ 2 ปัจจัย จะได้คลื่นความถี่ที่ต้องวิเคราะห์เพิ่มเติมคือ $\{.07, .29, .32, .46, .25, .39\}$ ดังนั้นคลื่นความถี่ที่ต้องพิจารณาทั้งหมดคือ

$\{.11, .18, .43, .22, .36, .14, .07, .29, .32, .46, .25, .39\}$ จาก

คลื่นความถี่ดังกล่าวนี้ ให้คำนวณความแตกต่างของคลื่นความถี่ของทุกคู่ และให้เลือกค่าความแตกต่างที่น้อยที่สุดเป็นค่า b จากตัวอย่างนี้จะได้ค่า $b = 0.03$

ดังนั้นสามารถคำนวณความยาวในการรัน (n) ได้ดังนี้

$$n = \left(\frac{4}{3b}/2\right)^2 \quad (5)$$

จากตัวอย่างจะได้จำนวนการรัน $n = 494$ รอบ

อย่างไรก็ตามถ้าผู้วิจัยต้องการความแม่นยำในการตรวจสอบสเปกตรัมในโดเมนความถี่ การรันควรมีจำนวนมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

4. การสรุปผล

ในการสรุปผลการคัดเลือกปัจจัยโดยวิธี FDE สามารถวิเคราะห์ได้โดย สร้างกราฟโดเมนความถี่ (Frequency Domain Graph) ซึ่ง Lee W. Schruben [10] ได้เป็นนำเสนอแนวคิดนี้ โดยปกติกราฟนี้ได้ค่าจำนวนจากอัตราส่วนสเปกตรัมของโดเมนความถี่ที่กำหนดคลื่นความถี่ต่างๆ ให้กับปัจจัย (Signal Run) เพื่อใช้ในการรันการจำลองสถานการณ์กับ โดเมนความถี่ที่ควบคุม (Control Run) เมื่อไม่มีการกำหนดคลื่นความถี่ให้ปัจจัยผลลัพธ์ของกราฟที่ได้จะพบว่าเมื่อปัจจัยใดที่มีอิทธิพลต่อตัวผลตอบสนอง ที่ระดับคลื่นความถี่ที่กำหนดให้ปัจจัยนั้นจะส่งผลต่อกราฟที่คลื่นความถี่ดังกล่าวมีความสูงมากกว่าคลื่นความถี่อื่นๆ วิธีการพิจารณาแบบกราฟโดเมนความถี่นี้เป็นวิธีการที่ง่าย สะดวกต่อการใช้งาน นอกจากนี้ยังมีวิธีการวิเคราะห์ที่สามารถตัดสินใจได้ เช่น Sanchez *et al.* [11] ได้ใช้การทดสอบสมมติฐานทางสถิติในการวิเคราะห์ผล เป็นต้น

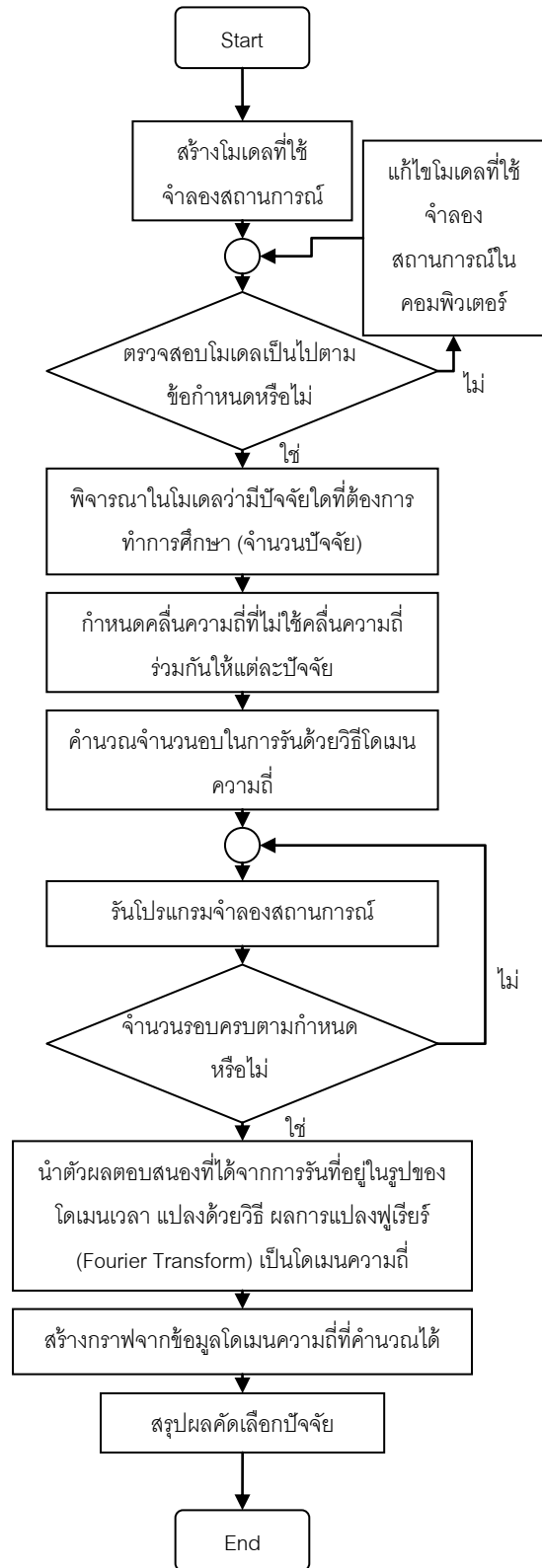
4. ขั้นตอนวิธีโดเมนความถี่เพื่อจำลองสถานการณ์

ในการนำวิธีโดเมนความถี่ไปประยุกต์ใช้กับการจำลองสถานการณ์เพื่อคัดเลือกปัจจัยมีขั้นตอนวิธีสำคัญดังแสดงในรูปที่ 2

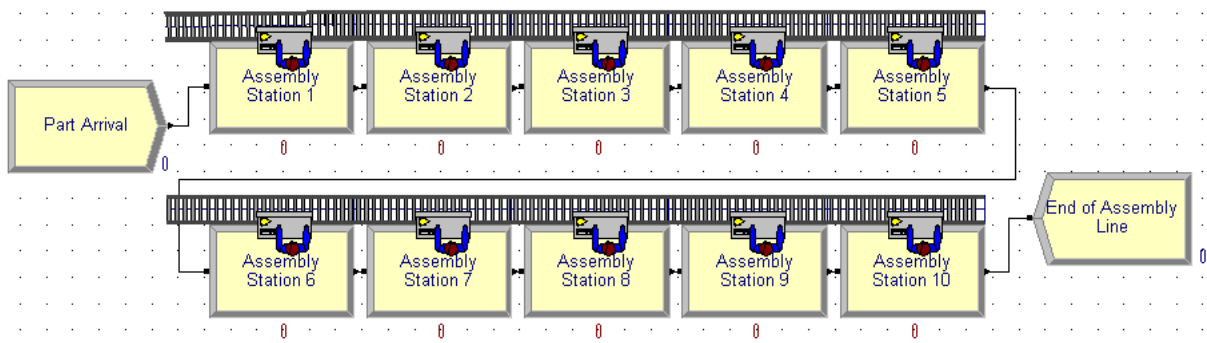
5. วิธีการวิจัย

5.1. ปัญหา

การวิจัยนี้ใช้ การผลิตแบบสายการประกอบ (Assembly Line Production) มาเป็นโมเดลในการทดลองคัดเลือกปัจจัยด้วยวิธีโดเมนความถี่ดังรูปที่ 3 และได้แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 กรณี ดังนี้



รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนวิธีโดเมนความถี่เพื่อการจำลองสถานการณ์



รูปที่ 3 แสดงการผลิตแบบสายการประกอบ

กรณีศึกษาที่ 1

จากรูปที่ 3 โมเดลนี้มีการประกอบสินค้า 1 ชนิด โดยมีช่วงเวลาห่างการเข้ามาของวัสดุที่ต้นสายการผลิตแบบการแจกแจงเอกซ์โพเนนเชียลมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3 ชั้นต่อนาที หรือเขียนเชิงสัญลักษณ์ได้ว่า $Exp(0.3)$ ในสายการประกอบมีจำนวนสถานีเพื่อการประกอบ 10 สถานี แต่ละสถานีมีเครื่องจักรเพื่อให้พนักงานควบคุมการประกอบใช้ตัดสินใจติดตั้งเครื่องจักรที่ใช้ในการประกอบได้จำนวน 1 ถึง 5 เครื่อง และแต่ละสถานีมีเวลาในการประกอบที่เป็น การแจกแจงเอกซ์โพเนนเชียลดังตารางที่ 1

โมเดลการประกอบนี้ทำงาน 24 ชั่วโมงต่อวัน และถ้า จำนวนผลผลิตที่ออกจากระบบ และเวลารอคอยรวมโดยเฉลี่ยต่อสินค้า เป็นผลตอบสนองที่ต้องการศึกษา พนักงานควบคุมการประกอบต้องให้ความสำคัญกับสถานีการประกอบสถานีใด ที่ให้ผลกระทบต่อผลตอบสนองที่ต้องการศึกษา

จากโมเดลนี้จะพบว่า สถานีเป็นปัจจัยที่ต้องการศึกษา ต่อผลตอบสนอง และผู้วิจัยจึงกำหนดให้สถานีที่ 2 เป็น สถานีที่มีผลต่อจำนวนผลผลิตออกจากระบบ และเวลารอคอยรวมโดยเฉลี่ยต่อสินค้า เพื่อใช้ทดสอบวิธีโดเมน ความถี่การค้นหาปัจจัยแบบไม่ต่อเนื่องที่มีความสำคัญต่อ สายการประกอบ

ตารางที่ 1 แสดงเวลาในการประกอบ และการพิจารณาการใช้ให้เป็นประโยชน์ แต่ละปัจจัยของกรณีศึกษาที่ 1

ปัจจัย	จำนวนเครื่องจักร	เวลาการประกอบ	การใช้ประโยชน์:
		(ชั้น/นาที)	ร้อยละ (Utilization)
สถานี 1	1-5	$Exp(0.2)$	22
สถานี 2	1-5	$Exp(0.9)$	100
สถานี 3	1-5	$Exp(0.2)$	22
สถานี 4	1-5	$Exp(0.2)$	22
สถานี 5	1-5	$Exp(0.2)$	22
สถานี 6	1-5	$Exp(0.2)$	22
สถานี 7	1-5	$Exp(0.2)$	22
สถานี 8	1-5	$Exp(0.2)$	22
สถานี 9	1-5	$Exp(0.2)$	22
สถานี 10	1-5	$Exp(0.2)$	22

กรณีศึกษาที่ 2

จากรูปที่ 3 โมเดลนี้มีการประกอบสินค้า 1 ชนิด มีลักษณะโดยรวมเหมือนกันกับ กรณีศึกษาที่ 1 แต่ผู้วิจัยได้ทดลองปรับเวลาในการประกอบที่สถานีที่ 9 จากอัตราการผลิตประกอบเป็นแบบการแจกแจงเอกซ์โพเนนเชียล ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.2 ชั้นต่อนาที เป็น 0.9 ชั้นต่อนาที เพื่อให้ปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนองมี 2 ปัจจัย ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงเวลาในการประกอบ และการพิจารณาการใช้ให้เป็นประโยชน์ แต่ละปัจจัยของกรณีศึกษาที่ 2

ปัจจัย	จำนวนเครื่อง	เวลาการประกอบ	การใช้ประโยชน์: ร้อยละ
	จักร	(ชิ้น/นาท)	(Utilization)
สถานี 1	1-5	Exp(0.2)	22
สถานี 2	1-5	Exp(0.9)	100
สถานี 3	1-5	Exp(0.2)	22
สถานี 4	1-5	Exp(0.2)	22
สถานี 5	1-5	Exp(0.2)	22
สถานี 6	1-5	Exp(0.2)	22
สถานี 7	1-5	Exp(0.2)	22
สถานี 8	1-5	Exp(0.2)	22
สถานี 9	1-5	Exp(0.9)	100
สถานี 10	1-5	Exp(0.2)	22

5.2. การวางแผนการทดลอง

การวางแผนการทดลองของทั้ง 2 กรณีศึกษามีขั้นตอนดังตารางที่ 3 พบว่า จำนวนที่จะต้องรันทั้งสิ้นด้วยวิธีโดเมนความถี่ในกรณีปัจจัยแบบไม่ต่อเนื่อง 512 รัน ถ้าคัดเลือกปัจจัยโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k โดยเทคนิคนี้จะกำหนดค่าที่ทำให้ปัจจัยแล้วรันการจำลองสถานการณ์ และจะเปลี่ยนค่าปัจจัยเพื่อรันการจำลองตามจำนวน 2^k ดังนั้นการใช้เทคนิคดังกล่าวนี้ จำเป็นต้องรันการจำลองสถานการณ์ทั้งสิ้น $2^{10} = 1,024$ รัน และในแต่ละรันการจำลองสถานการณ์ถ้าทำซ้ำ 30 รอบ ก็จะพบว่าต้องรันการจำลองสถานการณ์จำนวนผลการทดลองทั้งสิ้น 30,720 รัน

5.3 ผลการวิจัย

กรณีศึกษาที่ 1

การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้ ใช้โปรแกรม Arena Version 12.0 ได้ผลการทดลองดังรูปที่

4 ซึ่งแสดงโดเมนความถี่ที่ระดับ 1/512 ถึง 256/512 ของผลผลิตที่ออกจากระบบพบว่า ตามแนวแกน x ที่แสดงความถี่ จุดที่ความถี่ 23/512 เป็นจุดที่เด่นที่สุด และที่ความถี่นี้เป็นความถี่ที่กำหนดให้กับสถานีที่ 2 ของการผลิตแบบสายการประกอบ แสดงให้เห็นชัดเจนว่า วิธีโดเมนความถี่สามารถคัดเลือกปัจจัยแบบไม่ต่อเนื่องที่มีความสำคัญต่อการผลิตได้ และนอกจากจะคัดเลือกปัจจัยหลัก (Main Factor) วิธีโดเมนความถี่สามารถพิจารณาพหุนามกำลัง 2 ของปัจจัยได้ โดยที่ความถี่ 46/512 เป็นจุดที่เป็นคลื่นความถี่ของพหุนามกำลัง 2 ของสถานีที่ 2 ถูกกำหนด แสดงว่าพหุนามกำลัง 2 ของสถานีที่ 2 มีอิทธิพลต่อการผลิตด้วยเช่นกัน และถ้าพิจารณาผลตอบสนองที่สนใจเป็นเวลารอคอยรวมโดยเฉลี่ยต่อสินค้า ก็ให้ผลเช่นเดียวกันกับการพิจารณาผลตอบสนองที่สนใจในผลผลิตของการประกอบที่ออกจากระบบ ดังรูปที่ 5

กรณีศึกษาที่ 2

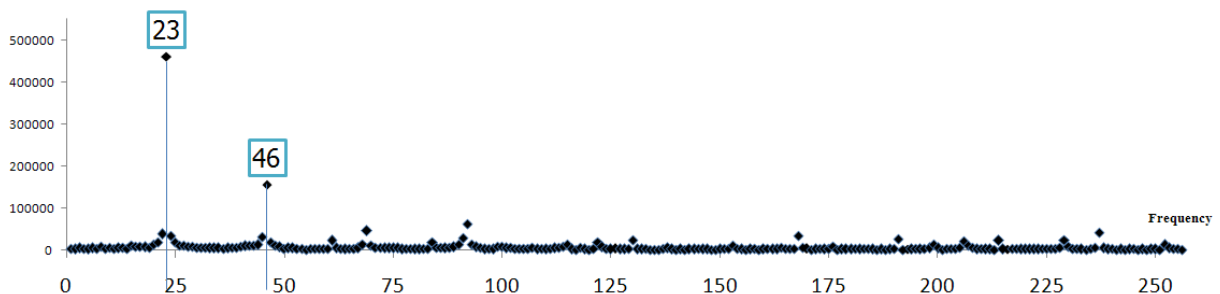
หลังจากนั้น เมื่อผู้วิจัยได้ทดลองปรับเวลาในการประกอบที่สถานีที่ 9 จากอัตราประกอบเป็นแบบการแจกแจงเอกซ์โพเนนเชียล ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.2 ชิ้นต่อนาที เป็น 0.9 ชิ้นต่อนาที

ขั้นตอนการทดลองยังคงเดิม และทำการรันจำนวน 512 รันกับชุดตัวแปรสุ่มชุดเดิมจากการทดลองครั้งแรก ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6 และ 7 ซึ่งพบว่า ที่ความถี่ 23/512 และ 193/512 เป็นความถี่เด่นที่สุด โดยเป็นสถานีการประกอบที่ 2 และ 9 ตามลำดับ นอกจากนี้วิธีโดเมนความถี่ยังตรวจพบพหุนามกำลัง 2 ของสถานีทั้ง 2 มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองที่สนใจศึกษาด้วย นั่นคือ ความถี่ 46/512 เป็นพหุนามกำลัง 2 ของสถานีที่ 2 และ 126/512 เป็นพหุนามกำลัง 2 ของสถานีที่ 9 ตามลำดับ

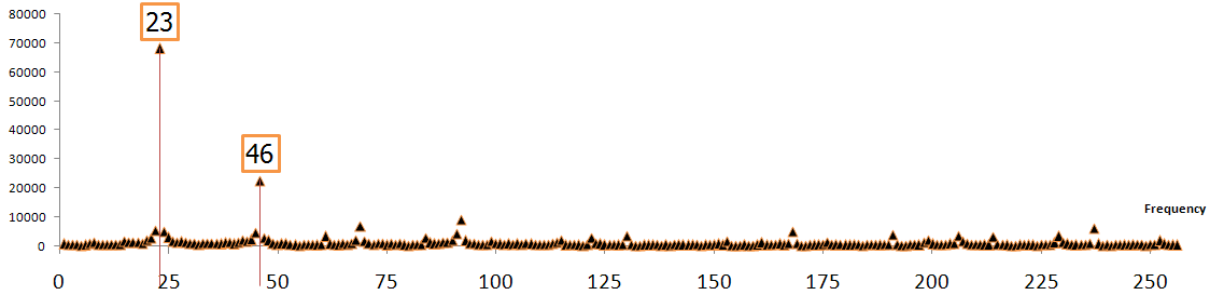
เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วมของปัจจัย คือ อิทธิพลร่วมของสถานีที่ 2 และสถานี 9 พบว่า เกิดอิทธิพลร่วมกันของทั้งสองสถานีกับตัวแปรผลตอบสนองที่สนใจ โดยพิจารณาได้จากความถี่ 170/512 และ 216/512

ตารางที่ 3 แสดงขั้นตอนการทดลองจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

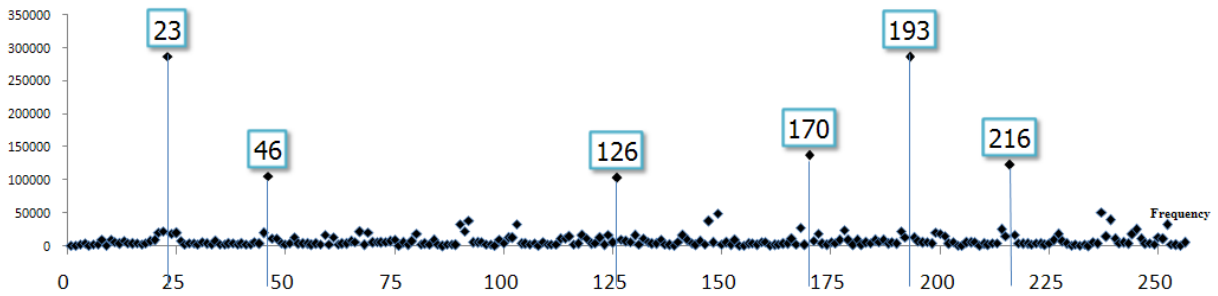
ขั้นตอนที่	วิธีการ	โมเดลของงานวิจัย
1	สร้าง โมเดลที่ใช้จำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์	การผลิตแบบสายการประกอบสร้างโมเดล ในโปรแกรม Arena Version 12.0
2	พิจารณาใน โมเดลว่ามีปัจจัยใดที่ต้องการทำการศึกษา	10 ปัจจัย
3	กำหนดคลื่นความถี่ที่ไม่ใช้คลื่นความถี่ร่วมกันให้แต่ละปัจจัย	$\omega_1 = 19/512$ ของสถานที่ 1 $\omega_2 = 23/512$ ของสถานที่ 2 $\omega_3 = 25/512$ ของสถานที่ 3 $\omega_4 = 52/512$ ของสถานที่ 4 $\omega_5 = 59/512$ ของสถานที่ 5 $\omega_6 = 113/512$ ของสถานที่ 6 $\omega_7 = 124/512$ ของสถานที่ 7 $\omega_8 = 180/512$ ของสถานที่ 8 $\omega_9 = 193/512$ ของสถานที่ 9 $\omega_{10} = 210/512$ ของสถานที่ 10
4	กำหนดจำนวนรอบในการรัน และรันระบบ	$n = 512$ นั่นคือ 1 วัน หรือ 24 ชั่วโมงเป็น 1 รัน ดังนั้นต้องรันจำนวนทั้งสิ้น 512 วัน (รัน)
5	นำตัวผลตอบสนองที่ได้จากการรันที่อยู่ในรูปของโดเมน เวลา แปลงด้วยวิธี ผลการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) เป็น โดเมนความถี่	นำข้อมูลจากการรัน 512 ค่าแปลงเป็น โดเมนความถี่ ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel คำสั่ง Fourier Analysis
6	สร้างกราฟจากข้อมูลโดเมนความถี่ที่คำนวณได้	นำผลจากการการแปลงโดเมนความถี่ จำนวน 256 มาสร้างกราฟด้วยโปรแกรม Microsoft Excel



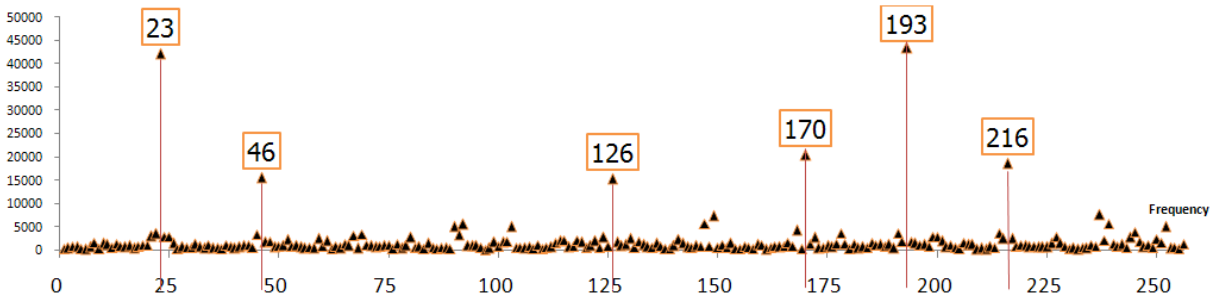
รูปที่ 4 แสดงโดเมนความถี่ของผลผลิตของการประกอบที่ออกจากระบบ



รูปที่ 5 แสดงโดเมนความถี่ของเวลารอคอยรวมโดยเฉลี่ยต่อสินค้า ที่สินค้ารอประกอบในแต่ละสถานี



รูปที่ 6 แสดงโดเมนความถี่ของผลผลิตของการประกอบที่ออกจากระบบ
เมื่อสถานี 9 เปลี่ยนอัตราการประกอบเป็น 0.9 นาทีต่อชิ้น



รูปที่ 7 แสดงโดเมนความถี่ของเวลารอคอยรวมโดยเฉลี่ยต่อสินค้า ที่สินค้ารอประกอบในแต่ละสถานี
เมื่อสถานี 9 เปลี่ยนอัตราการประกอบเป็น 0.9 นาทีต่อชิ้น

ดังนั้นวิธีการ โดเมนความถี่สามารถตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยหลัก อิทธิพลของพหุนามกำลัง 2 และอิทธิพลรวมของทั้ง 2 ปัจจัยได้โดยทำการทดลองเพียง 512 วัน

ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ในตัวอย่างนี้ จำเป็นต้องรันการจำลองสถานการณ์ ทั้งสิ้น $2^{10} = 1,024$ วัน และในแต่ละวันการจำลองสถานการณ์เรา

ทำซ้ำ 30 รอบ ดังนั้นจากตัวอย่างจะพบว่าต้องรันการจำลองสถานการณ์จำนวนผลการทดลองทั้งสิ้น 30,720 วัน ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบเทคนิค โดเมนความถี่ กับ การทดลองเชิงแฟกทอเรียล

รายการ	วิธีโดเมนความถี่	การทดลองเชิงแฟกทอเรียล
จำนวนรัน	512	30,720
เวลาในการรัน (หน่วย: นาที)	26 นาที	1,536 นาที (26 ชั่วโมง)

จากตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่า วิธีโดเมนความถี่สามารถพิจารณาได้ทั้งอิทธิพลหลักของปัจจัย อิทธิพลร่วมกันของปัจจัย และพหุนามของปัจจัย โดยใช้จำนวนในการรัน และเวลาการรัน จำนวนน้อยกว่าวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ซึ่งทั้งสองวิธีนี้ให้ผลการคัดเลือกปัจจัยไม่แตกต่างกัน

6. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

วิธีการ โดเมนความถี่เป็นวิธีการคัดเลือกปัจจัยที่มีประสิทธิภาพ สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งอิทธิพลจากปัจจัยหลัก อิทธิพลร่วมกันของปัจจัย และพหุนามของปัจจัย ถึงแม้ว่าจะมีปัจจัยที่สนใจศึกษาจำนวนมาก จำนวนการรันการจำลองสถานการณ์ก็ใช้จำนวนไม่มากเท่ากับวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k แต่อย่างไรก็ตามจำนวนการรันนี้มีส่วนที่ต้องสังเกต คือ ถ้าคัดเลือกปัจจัยแบบต่อเนื่อง การทดลองจะใช้จำนวนรัน 2-3 รันเท่านั้นก็เพียงพอต่อการคัดเลือกปัจจัยดัง วฐา และพรเทพ [12] ได้นำเสนอไว้ แต่ส่วนในงานวิจัยนี้ ถ้าปัจจัยแบบไม่ต่อเนื่อง เช่น ปัจจัยเป็นจำนวนคน หรือ เครื่องจักร การทดลองต้องการจำนวนรันมากขึ้น เนื่องจากการคัดเลือกปัจจัยแบบไม่ต่อเนื่อง การเปลี่ยนค่าของปัจจัยที่ปรับเปลี่ยนค่าตามคลื่นความถี่จะไม่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตามการเข้ามาของวัสดุ หรือ ชิ้นงานแต่ละชิ้น แต่จะปรับเปลี่ยนค่าได้เมื่อสิ้นวันทำงาน แต่ถ้าเป็นกรณีปัจจัยแบบต่อเนื่อง เช่น ปัจจัยเป็นเวลาการเข้ามาของวัสดุ (Time of Arrival) หรือ เวลาการผลิตชิ้นงาน (Service time) ปัจจัยเหล่านี้มีการเปลี่ยนค่าของปัจจัยที่ปรับเปลี่ยนค่าตามคลื่น

ความถี่สามารถปรับค่าได้ในแต่ละเข้ามาของวัสดุ นั่นคือหน่วยเวลา (t) ของปัจจัยแบบต่อเนื่องจะเป็นการเปลี่ยนแปลงของระบบ เช่น การเข้ามาของวัสดุ การเข้ารับบริการที่สถานีงาน เป็นต้น แต่หน่วยเวลา (t) ของปัจจัยแบบไม่ต่อเนื่องจะเป็นการจบการทำงานในช่วงเวลาที่สนใจ เช่น เวลาการผลิต 24 ชั่วโมง เป็นต้น นั่นเป็นสาเหตุที่ทำให้การรันการจำลองสถานการณ์ที่มีปัจจัยแบบไม่ต่อเนื่องมีจำนวนมากกว่าการคัดเลือกปัจจัยแบบต่อเนื่องแต่อย่างไรก็ตามจำนวนการรันก็ยังน้อยกว่าจำนวนการรันโดยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

วิธีการ โดเมนความถี่นี้ อาจจะสร้างปัญหาได้ในการจัดทำเริ่มแรก เนื่องจากเป็นวิธีที่แตกต่างกันอย่างมากกับวิธีอื่นที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เทคนิคการเปลี่ยนโดเมนของเวลาไปเป็น โดเมนความถี่ ก็มีเพียงบางสาขาเท่านั้นที่ทำการศึกษา แต่จริงๆ แล้วการคำนวณเหล่านี้มีโปรแกรมสำเร็จรูปมากมายสามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งในงานวิจัยนี้ก็ได้นำโปรแกรม Microsoft Excel ที่ปกติใช้กันอย่างกว้างขวางทั่วไปในปัจจุบันมาใช้คำนวณ

งานวิจัยนี้จะถูกพัฒนาต่อเนื่อง ผู้วิจัยจะนำวิธีการโดเมนความถี่นี้เข้าไปทำการคัดเลือกปัจจัยกับระบบงานในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความซับซ้อน และมีจำนวนปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากขึ้น เช่น การผลิตตามงาน (Job Shop) เป็นต้น รวมทั้งการพัฒนาให้วิธีการนี้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างสะดวก และง่ายกับการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ของผู้ที่สนใจทั่วไปที่ต้องการคัดเลือก หรือหาผลกระทบของปัจจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Trocine, L. and L. C. Malone, An Overview of Newer, Advanced Screening Methods for the Initial Phase in an Experimental Design, Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, pp. 169-178, 2001.
- [2] Hinkelmann, K. and O. Kempthorne, Design and Analysis of Experiments. Volume 2 Advanced

- Experimental Design, A John Wiley & Sons, INC., Publication, 780 p., 2005.
- [3] Holcomb, D. R., D. C. Montgomery and W. M. Carlyle, Analysis of Supersaturated Design, Technical Report, Arizona State University, 2000.
- [4] Wan, H., B. Ankenman and B. L. Nelson, Controlled Sequential Bifurcation: a New Factor-Screening Method for Discrete-event Simulation, Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, pp. 565-573, 2003.
- [5] Bettonvil, B. and Jack P.C. Kleijnen, Searching for Important Factors in Simulation Models with Many Factor: Sequential Bifurcation, European Journal of Operational Research 96, pp. 180-194, 1996.
- [6] Wan, H., B. Ankenman, and B. L. Nelson, Simulation Factor Screening with Controlled Sequential Bifurcation in the Presence of Interactions, Working Paper. Available online via <http://web.ics.purdue.edu/~hwan/WanAnkenmanNelsonCSBX.pdf>, pp. 1-29, 2006.
- [7] Schruben, L.W. and V.J. Cogliano, An Experimental Procedure for Simulation Response Surface, Comm. ACM 30, pp. 716-730, 1987.
- [8] Jacobson, S. H., A. H. Buss and L. W. Schruben, Driving Frequency Selection for Frequency Domain Simulation Experiments, Operations Research 39, pp. 917-924, 1991.
- [9] Jacobson, S. H., Oscillation Amplitude Considerations in Frequency Domain Experiments, Proceedings of the 1989 Winter Simulation Conference, pp. 406-410, 1989.
- [10] Schruben, L. W., Simulation Optimization Using Frequency Domain Methods, Proceedings of the 1986 Winter Simulation Conference, pp. 366-369, 1986.
- [11] Sanchez, S. M., F. Moeeni and P. J. Sanchez, So Many Factors, So Little Time... Simulation Experiments in the Frequency Domain, Science Direct, Int. J. Production Economics 103, pp. 149-165, 2006.
- [12] วรฐามินเสน และพรเทพ อนุสรณินดีสาร, การจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อการคัดเลือกปัจจัยด้วยวิธีโดเมนความถี่, การประชุมวิชาการแบบจำลองสถานการณ์เพื่อการตัดสินใจที่ดีกว่า, สมาคมการสร้างแบบจำลองและการจำลองสถานการณ์แห่งประเทศไทย (สบจท.), ณ อาคารสารนิเทศ 50 ปี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วันที่ 1-2 เมษายน 2551, น. 276-285.