



การหาค่าที่ดีที่สุดของการจัดตารางการผลิตแบบทำตามสั่งโดยการใช้วิธีฮาร์โมนีเสริญ อภิรักษ์ ขัดวิลารต์^{a*} และ ปุพงษ์ พงษ์เจริญ^b

Job Shop Scheduling Optimisation Using Harmony Search Algorithm

Aphirak Khadwilard^{a*} and Pupong Pongcharoen^b

^aสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาตาก จังหวัดตาก

^bภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

^aDepartment of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak, Tak Province.

^bDepartment of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Pitsanulok Province.

*Corresponding Author. E-mail address: aphirak@rmutl.ac.th

Received 30 May 2011; accepted 31 August 2011

บทคัดย่อ

ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบทำตามสั่งเป็นปัญหาที่เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ปัญหานี้ถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มเอ็นพี แบบยาก (NP-hard) ซึ่งไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ในเวลาโพลิโนเมียล ดังนั้นวิธีการในกลุ่มเมตาฮิวริสติกที่ชื่อว่า วิธีฮาร์โมนีเสริญ (HSA) ซึ่งเลียนแบบการหาเมโลดี้ที่มีความไพเราะในการประสานเสียงของเครื่องดนตรี จึงถูกนำเสนอในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาทดสอบการจัดตารางการผลิตแบบทำตามสั่งจำนวน 5 ปัญหา คือ FT06 (6 x 6), LA01 (10 x 5), LA06 (10 x 10), LA11 (15 x 5) และ LA16 (20 x 5) (เครื่องจักร x งาน) ตามลำดับ ในการศึกษาครั้งนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วน คือ การทดลองที่หนึ่งเพื่อหาค่าปัจจัยที่ดีที่สุดของวิธีฮาร์โมนีเสริญ โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล และการทดลองที่สอง ทำการเปรียบเทียบคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองกับคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาทดสอบแต่ละปัญหา และเปรียบเทียบกับคำตอบที่ได้จากวิธี GA และ SA จากผลการทดลองพบว่าปัญหาทดสอบ FT06 LA01 LA06 และ LA11 วิธีฮาร์โมนีเสริญสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุด ยกเว้นปัญหาทดสอบ LA16 ซึ่งเป็นปัญหามหาศาลไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุด แต่สามารถหาคำตอบที่ใกล้เคียงพบในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี GA (Genetic Algorithm) และ SA (Simulated Annealing) พบว่า วิธี HSA สามารถหาคำตอบได้ดีกว่าวิธีการทั้งสอง

คำสำคัญ: ตารางการผลิตแบบทำตามสั่ง เมตาฮิวริสติก วิธีฮาร์โมนีเสริญ

Abstract

Job shop scheduling problem (JSSP) is one of the most famous scheduling, most of which are categorized into non-deterministic polynomial-hard (NP-hard) and cannot be solved in polynomial time. In this study, therefore, a metaheuristic called Harmony Search Algorithm (HSA), which is based on the melody fine tuning conducted by musician for optimising the synchronisation of the music, was proposed for finding optimal solution to five benchmarking job shop scheduling problems including problem FT06 (6 x 6), LA01 (10 x 5), LA06 (10 x 10), LA11 (15 x 5) and LA16 (20 x 5) (machine x job), respectively. In this research, Experiments were separated be two parts. The first experiment was used to systematically identify the best parameters of HSA by using 2^k factorial design and the second experiment was used to compare its performance with Genetic Algorithm (GA), Simulated Annealing (SA) and optimal solution of each problem. From the result of experiments, it was found that HAS can find the optimal solution for most problems, FT06, LA01, LA06 and LA11, except LA16, but it can find near optimal solution. For comparing with GA and SA, it can be seen that HSA outperformed both GA and SA.

Keywords: Job Shop Scheduling, Metaheuristic, Harmony Search Algorithm

บทนำ

ปัญหาการจัดตารางพบได้ทั่วไปในการประยุกต์ใช้กับปัญหาจริง เช่น การขนส่ง การจัดการ การก่อสร้าง การผลิต โดยเฉพาะในวงการของอุตสาหกรรมการผลิต ปัญหาการจัดตารางการผลิตในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ค่อนข้างซับซ้อนและมีความยากในการใช้วิธีการหาค่าที่ดีที่สุดแบบเก่าในการหาคำตอบ ดังนั้น จึงเป็นประเด็นที่นักวิจัยหลากหลายวงการสนใจ เช่น วงการวิจัยดำเนินงาน วิทยาการจัดการ ปัญญาประดิษฐ์ และวิศวกรรมศาสตร์ เป็นต้น เป็นที่ทราบกันดีว่าปัญหาการจัดตารางการผลิต

แบบทำตามสั่ง (Job Shop Scheduling Problem, JSSP) เป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนและใช้ทั่วไปในการจัดตารางการผลิต ซึ่งปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบทำตามสั่งนั้น เป็นปัญหาที่จัดอยู่ในกลุ่มเอ็นพีแบบยาก (NP-hard) และไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ในเวลาที่เหมาะสม (Garey et al., 1976)

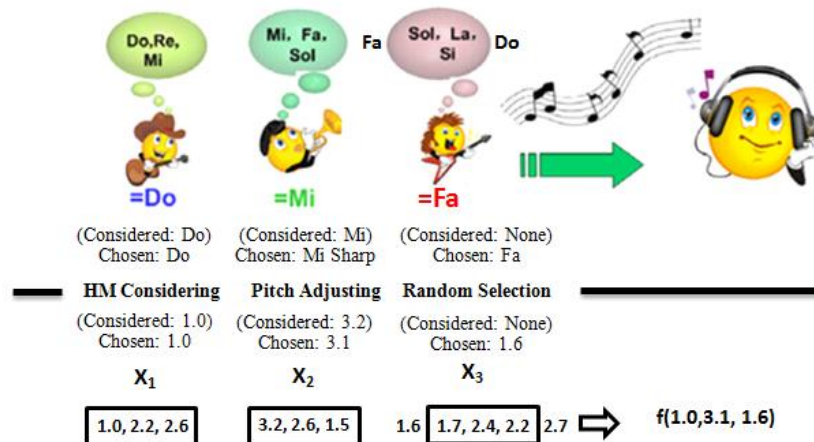
วิธีการหาค่าที่ดีที่สุดแบบดั้งเดิมหลายวิธีได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบทำตามสั่ง วิธีการเหล่านี้อยู่บนพื้นฐานของโมเดลทางคณิตศาสตร์ หรือ วิธีการเชิงตัวเลข (Numerical method) เช่น วิธี Branch and Bound (Artigues & Feillet, 2007;

Artigues et al., 2011) และ วิธี Lagrangian Relaxation (Baptiste et al., 2008; Chen & Luh, 2003) ซึ่งสามารถยืนยันคำตอบที่ดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น วิธีการเหล่านี้ไม่สามารถประมวลผลได้ในเวลาที่เหมาะสม ดังนั้นวิธีการหาคำตอบแบบประมาณค่าหลายวิธีซึ่งถูกเรียกว่า วิธีเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้นในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมา เช่น วิธีการค้นหาแบบต้องห้าม (Tabu search) (Glover & Laguna, 1998) วิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated annealing) (Yang, 2008) วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) (Gen & Cheng, 1997) วิธีอาณานิคม (Ant Colony Optimisation) (Dorigo & Stutzle, 2004) วิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimisation) (Kennedy & Eberhart, 2001) และวิธีฮาร์โมนีเสิร์จ (Harmony Search Algorithm) (Yang, 2008) เป็นต้น เนื่องจากวิธีฮาร์โมนีเสิร์จเป็นวิธีการในกลุ่มเมตาฮิวริสติกที่ใหม่และถูกนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาในการหาค่าที่ดีที่สุดหลายปัญหา เช่น ปัญหาการออกแบบโครงสร้าง (Structural optimisation) (Lee & Geem, 2004) ปัญหาการหาเส้นทางเดินทาง (Vehicle Routing) (Geem et al., 2005) และ ปัญหาการจัดตารางการระบายน้ำของเขื่อน (scheduling of multiple dam system) (Geem, 2007) เป็นต้น แต่มีการนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาการจัดตารางการผลิตค่อนข้างน้อย ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงสนใจที่จะนำวิธีฮาร์โมนีเสิร์จมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบทำตามสั่ง โดยจะทำการศึกษาคำตัวแปรที่เหมาะสม และทำการเปรียบเทียบค่าของคำตอบที่ได้จากวิธีฮาร์โมนีเสิร์จกับคำตอบที่ดีที่สุด

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

1. วิธีฮาร์โมนีเสิร์จ (Harmony Search Algorithm, HSA)

วิธีฮาร์โมนีเสิร์จถูกพัฒนาโดย Geem และคณะ ในปี ค.ศ.2001 (Geem et al., 2001) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม ชื่อฮาร์โมนีเสิร์จได้แรงบันดาลใจมาจากการสังเกตการหาเสียงที่ไพเราะของเครื่องดนตรีที่นำมาเล่นร่วมกัน วิธีฮาร์โมนีเสิร์จประกอบไปด้วยแนวคิดสามอย่างในการสร้างคำตอบใหม่ คือ การใช้ข้อมูลในหน่วยความจำฮาร์โมนี (Harmony Memory, HM) การปรับพิตช์ (Pitch Adjusting) และ การสุ่ม (Randomisation) แนวคิดที่หนึ่งในการใช้ข้อมูลจากหน่วยความจำฮาร์โมนีเพื่อสร้างคำตอบใหม่นั้นจะทำการสุ่มเลือกจากหน่วยความจำฮาร์โมนีในกระบวนการนี้จะถูกควบคุมโดยอัตราการพิจารณาหน่วยความจำฮาร์โมนี (Harmony Memory Considering rate, HMCR) โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 แนวคิดที่สองในการปรับพิตช์นั้นประกอบไปด้วยตัวแปรสองตัวคือ แบนด์วิดท์ (Bandwidth, BW) ซึ่งจะทำให้การควบคุมระยะในการปรับ และ อัตราการปรับพิตช์ (Pitch Adjusting Rate, PAR) จะเป็นตัวกำหนดว่าจะมีการปรับพิตช์หรือไม่ และแนวคิดสุดท้ายคือการสุ่มค่าคำตอบจะเกิดขึ้นเมื่อค่าสุ่มถูกปฏิเสธจากค่า HMCR แนวคิดทั้งสามถูกแสดงดังรูปที่ 1 สำหรับขั้นตอนของวิธีฮาร์โมนีเสิร์จนั้นแสดงไว้ในรูปที่ 2



รูปที่ 1 แนวคิดของวิธีฮาร์โมนีเสิร์จ (ปรับปรุงจาก Xu et al., 2010)

Pseudo code of the Harmony Search algorithm (HSA)**Begin;**

```

Define objective function  $f(x)$ ,  $x=(x_1, x_2, \dots, x_d)^T$ 
Define harmony Memory Considering rate (HMCR)
Define Pitch adjusting rate (PAR) and other parameters
Generate Harmony Memory with random harmonies
while ( $t < \text{max number of iterations}$ )
  while ( $i \leq \text{number of variables}$ )
    if ( $\text{rand} < \text{HMCR}$ ),
      Choose a value from HM for the variable  $i$ 
      if ( $\text{rand} < \text{PAR}$ ),
        Adjust the value by adding certain amount
      end if
    else
      Choose a random value
    end if
  end while
  Accept the New Harmony (solution) if better
end while
Find the current best solution
end

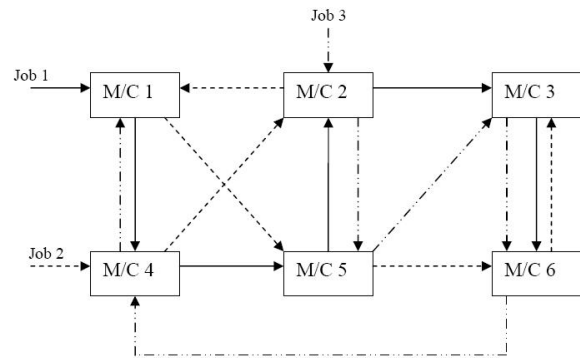
```

รูปที่ 2 ขั้นตอนของวิธีฮาร์โมนีเสิร์จ

2. ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบทำตามสั่ง (Job Shop Scheduling Problem, JSSP)

ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบทำตามสั่ง (Baker, 1974) เป็นการหาลำดับการผลิตของแต่ละงานในการดำเนินการบนแต่ละเครื่องจักรโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ช่วงกว้างของเวลาการทำงานน้อยที่สุด (Makespan) หรือเพื่อให้เวลาการผลิตทุกงานให้เสร็จมีค่าน้อยที่สุด ปัญหานี้จะมีการกำหนดรูปแบบโดยมีเครื่องจักรที่ต่างกัน m เครื่อง และมีงานที่ต่างกัน n งาน ($m \times n$) แต่ละงานจะประกอบด้วยชุดของลำดับขั้นตอนการผลิตบนแต่ละเครื่องจักรและเวลาที่ใช้ในการผลิตที่แตกต่างกัน ซึ่งจะถูกกำหนดด้วยข้อบังคับ (Constraints) สำหรับเครื่องจักรและงานดังนี้

- 1.) งานแต่ละงานจะไม่ใช้เครื่องจักรเครื่องเดิมกับที่เคยใช้อีกครั้ง
- 2.) ลำดับการผลิตของจะเป็นการกำหนดภายในแต่ละงานเท่านั้นไม่มีการกำหนดข้ามงานกัน
- 3.) ในระหว่างการผลิตจะไม่มีการขัดจังหวะ (ไม่มีการหยุดหรือแทรกงาน)
- 4.) แต่ละเครื่องสามารถทำการผลิตได้งานเดียวในแต่ละครั้ง
- 5.) ไม่มีการกำหนดเวลากำหนดส่งงาน



รูปที่ 3 ตัวอย่างของงานแบบทำตามสั่ง (Job Shop)

จากรูปที่ 3 แสดงตัวอย่างปัญหาการผลิตแบบทำตามสั่ง ซึ่งประกอบด้วย 6 เครื่องจักร 3 งาน (6×3) งานทุกงานจะเข้าสู่ระบบและผ่านทุกเครื่องจักรตามลำดับงานที่ถูกกำหนดไว้ ยกตัวอย่างเช่น งานที่ 1 จะเริ่มทำบนเครื่องจักรที่ 1 แล้วผ่านเครื่องจักร 4 5 2 3 และ 6 ตามลำดับ โดยทุกงานจะต้องเป็นไปตามข้อบังคับที่กล่าวไว้ข้างต้น

3. การประยุกต์ใช้วิธีฮาร์โมนีเสิร์จกับปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบทำตามสั่ง

1.) การสร้างหน่วยความจำฮาร์โมนี

พิจารณาปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบทำตามสั่งขนาด 3×3 ดังรูปที่ 4 ซึ่งแสดงเวลาในการดำเนินงานของแต่ละงาน และลำดับของงานที่ทำบนเครื่องจักร ตารางด้านซ้าย แสดงลำดับของการดำเนินการของแต่ละงาน (Job) เช่น งานที่ 1 (J1) การดำเนินการต้องเรียงจากการดำเนินการที่ 1 (O1) แล้วตามด้วย การดำเนินการที่ 2 (O2) และการดำเนินการที่ 3 (O3) ตามลำดับ เช่นเดียวกัน งานที่ 2 (J2) การดำเนินการต้องเรียงจากการดำเนินการที่ 1 (O4) แล้วตามด้วย การดำเนินการที่ 2 (O5) และการดำเนินการที่ 3 (O6) ตามลำดับ สำหรับลำดับการดำเนินงานของแต่ละงานนั้นจะเป็นอิสระต่อกัน ตารางกลางในรูปที่ 4 แสดงถึงเวลาของการดำเนินการในแต่ละลำดับงาน เช่น J1 (O1) ใช้เวลาในการดำเนินการ 2 หน่วยเวลา J2 (O5) ใช้เวลาในการดำเนินการ 4 หน่วยเวลา เป็นต้น ตารางด้านขวาแสดงถึงการดำเนินการบนเครื่องจักรของแต่ละลำดับงาน เช่น J3 (O8) ทำบนเครื่องจักร M3 และ J2 (O6) ทำบนเครื่องจักร M2 เป็นต้น

งาน				งาน				งานที่ทำบนเครื่องจักร		
ลำดับงาน				เวลาในการทำงาน				M1	M2	M3
J1	O1	O2	O3	J1(O1,O2,O3)	2	3	4	O1	O2	O3
J2	O4	O5	O6	J2(O4,O5,O6)	2	4	2	O5	O6	O4
J3	O7	O8	O9	J3(O7,O8,O9)	3	7	5	O7	O9	O8

รูปที่ 4 เวลาในการดำเนินงานและลำดับงานบนเครื่องจักร

ในขั้นตอนการสร้างหน่วยความจำฮาร์โมนีนั้น มีขั้นตอนในการสร้าง 3 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 การสุ่มค่าเริ่มต้นให้กับลำดับงาน ในขั้นตอนนี้ลำดับงานทุกลำดับงาน จะถูกนำมาเรียงเป็นแถวเดียว และทำการสุ่มเลขสุ่ม โดยการสุ่มแบบยูนิฟอร์ม $U[0,1]$ ให้กับแต่ละลำดับงาน ดังแสดงในรูปที่ 5

ขั้นตอนที่ 2 การเรียงลำดับงานตามค่าเลขสุ่ม หลังจากที่ได้แต่ละลำดับงานได้ค่าเลขสุ่มแล้วจะถูกเรียงตามลำดับของเลขสุ่ม โดยการเรียงจากค่าน้อยไปมาก ดังแสดงในรูปที่ 6

ขั้นตอนที่ 3 การซ่อมแซมลำดับงาน พิจารณาในรูปที่ 7 จะเห็นว่า ก่อนที่ลำดับงานจะถูกซ่อมแซม มีบางงานที่ลำดับงานเรียงไม่ถูกต้องตามลำดับ เช่น ลำดับงานของงาน J2 มีการเรียงลำดับ เป็น O6 O5 และ O4 แต่ลำดับที่ถูกต้อง คือ O4 O5 และ O6 ซึ่งจะมีผลทำให้ตารางการผลิตไม่สามารถผลิตได้จริง ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงทำการตรวจสอบ และทำการซ่อมแซม ดังแสดงในรูปที่ 7 เพื่อให้ลำดับงานถูกต้องและสามารถผลิตได้จริง

O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9
0.45	0.52	0.99	0.27	0.09	0.01	0.33	0.85	0.78

รูปที่ 5 สุ่มค่าตัวเลขในช่วง 0 - 1 ให้กับลำดับงานแต่ละลำดับ

O6	O5	O4	O7	O1	O2	O9	O8	O3
0.01	0.09	0.27	0.33	0.45	0.52	0.78	0.85	0.99

รูปที่ 6 เรียงลำดับค่าเลขสุ่มและย้ายลำดับงานตามเลขสุ่ม

O6	O5	O4	O7	O1	O2	O9	O8	O3
0.01	0.09	0.27	0.33	0.45	0.52	0.78	0.85	0.99
O4	O5	O6	O7	O1	O2	O8	O9	O3
0.27	0.09	0.01	0.33	0.45	0.52	0.85	0.78	0.99
O4	O5	O6	O7	O1	O2	O8	O9	O3
0.27	0.09	0.01	0.33	0.45	0.52	0.85	0.78	0.99

รูปที่ 7 ตรวจสอบและย้ายลำดับในแต่ละงานให้ถูกต้อง

2.) การประเมินค่าวัตถุประสงค์

เมื่อได้ลำดับงานในการจัดตารางการผลิตแล้วนำลำดับงานที่ได้ไปจัดตารางลงในแผนภูมิแกนต์ และทำการประเมินค่าวัตถุประสงค์ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ช่วงกว้างของเวลาการทำงานน้อยที่สุด (Makespan) ซึ่งแสดงในสมการ

$$\text{Minimises : } C_{\max} = \max(C_1, C_2, \dots, C_k)$$

โดยที่ C คือ เวลาสิ้นสุดของงาน

4. การออกแบบการทดลอง

เนื่องจากคุณภาพของคำตอบที่ได้จากวิธีในกลุ่มเมตาสวิรสติกล้นขึ้นอยู่กับการปรับปัจจัยให้มีค่าที่เหมาะสมกับปัญหา ดังนั้น จึงทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีฮาร์โมนีเสิร์จกับปัญหาการจัด

ตารางการผลิต ในการออกแบบการทดลองได้แบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือ การทดสอบหาตัวแปรที่เหมาะสมในการหาคำตอบ และ การทดสอบสมรรถนะของวิธีฮาร์โมนีเสิร์จ สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ปัญหาทดสอบห้าปัญหาคือ FT06 (6 x 6) LA01 (10 x 5) LA06 (15 x 5) LA11 (20 x 5) และ LA16 (10 x 10) (Beasley, 1990)

1.) การทดสอบหาตัวแปรที่เหมาะสมในการหาคำตอบ

ตัวแปรของวิธีฮาร์โมนีเสิร์จที่ศึกษาประกอบไปด้วยขนาดของหน่วยความจำ/จำนวนรอบในการวนซ้ำ (HMS/NI) ซึ่งจะกำหนดไว้ที่ 200,000 คำตอบ อัตราการพิจารณาหน่วยความจำฮาร์โมนี (HMCR) อัตราการปรับพิตซ์ (PAR) และ แบนด์วิดท์ (BW) ในส่วนของ HMCR และ PAR นั้น Yang (Yang, 2008) ได้แนะนำว่าควรใช้ค่าระหว่าง 0.7-0.95 และ 0.1-0.5 ตามลำดับ ดังนั้นเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีฮาร์โมนีเสิร์จกับปัญหาทดสอบโดยใช้ปัญหาขนาด 20 x 5 (LA11) ซึ่งเป็นปัญหาที่มีขนาดใหญ่ โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล (Montgomery, 2001) ดังนั้นการทดลองจึงเป็น $2^4 = 16$ การทดลอง สำหรับการทดลองนี้จะทำการทดสอบห้าซ้ำโดยการเปลี่ยนค่าสุ่มเริ่มต้น ดังนั้นจึงต้องทำการทดลอง $16 \times 5 = 80$ การทดลอง ในงานวิจัยนี้ปัจจัยต่างๆ ของวิธีฮาร์โมนีเสิร์จได้ถูกแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ	
	ต่ำ	สูง
HMS/NI	20/10000	10000/20
HMCR	0.5	0.9
PAR	0.1	0.5
BW	0.01	0.1

2.) การทดสอบสมรรถนะของวิธีฮาร์โมนีเสิร์จ

การทดลองนี้จะทำการใช้เลขสุ่มจำนวน 10 ค่า กับค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 1 ทำการทดสอบกับปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบทำตามสั่งทั้งห้าปัญหา โดยจะทำการตรวจสอบค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคำตอบสูงสุดที่พบจากวิธีฮาร์โมนีเสิร์จ และทำการเปรียบเทียบกับค่าคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาทดสอบว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด

ผลการศึกษา

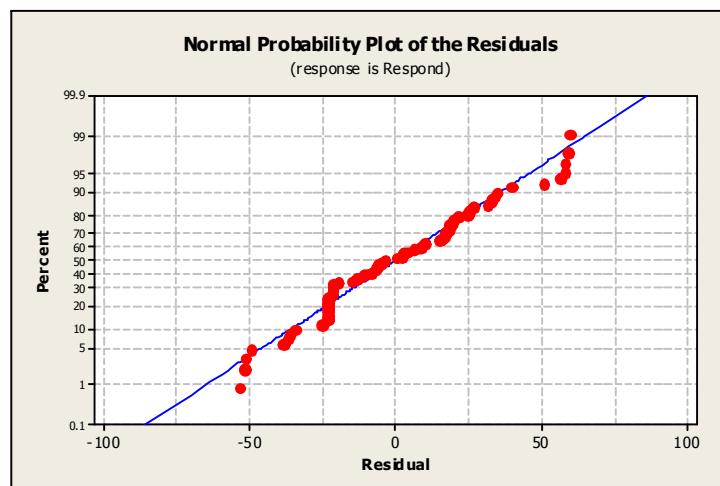
1. ผลการทดสอบระดับปัจจัยของวิธีฮาร์โมนีเสิร์จ หลังจากทำการทดสอบตามที่ออกแบบไว้ สามารถนำผลที่ได้ไปทดสอบสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ในรูปแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป ซึ่งได้แสดงผลดังตาราง 2 พบว่าค่าปัจจัย HMS/NI และ HMCR มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น

95% ซึ่งพิจารณาได้จากค่า P ที่น้อยกว่า 0.05 ทำให้ทราบว่าการหาค่าคำตอบของปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบทำตามสั่ง ในขณะที่ค่าปัจจัย PAR และ BW ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีค่า P มากกว่า 0.05 เมื่อพิจารณากราฟความน่าจะเป็นของการกระจายตัวปกติในรูปที่ 8 พบว่า

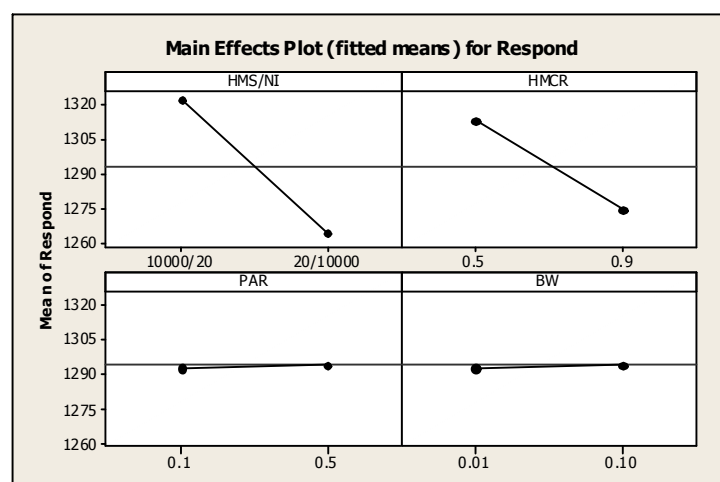
ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ และเมื่อพิจารณากราฟผลกระทบหลักในรูปที่ 9 สามารถสรุปได้ว่าควรกำหนดค่าปัจจัย HMS/NI, HMCR, PAR และ BW เท่ากับ 20/10000, 0.9, 0.1 และ 0.01 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนปัจจัยหลักของวิธีฮาร์โมนีเสริจัน

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
HMS/NI	1	66010	66010	66010	80.76	0.000
HMCR	1	29799	29799	29799	36.46	0.000
PAR	1	68	68	68	0.08	0.773
BW	1	54	54	54	0.07	0.797
Error	75	61299	61299	817		
Total	79	157232				



รูปที่ 8 กราฟแสดงการกระจายตัวของข้อมูลแบบปกติ



รูปที่ 9 กราฟผลกระทบหลักของปัจจัยของวิธีฮาร์โมนีเสริจัน

2. ผลการทดสอบสมรรถนะของวิธีฮาร์โมนีเสิร์จ
เมื่อได้ปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 แล้ว นำค่าปัจจัยที่ได้ทำการทดสอบกับปัญหาทดสอบทั้งห้าด้วยค่าสุ่มเริ่มต้น (Seed) 30 ค่า พบว่าวิธีฮาร์โมนีเสิร์จสามารถหาคำคำตอบที่ดีที่สุดได้ในปัญหา FT06 (6 x 6) LA01 (10 x 5) LA06 (15 x 5) และ LA11 (20 x 5) ยกเว้นปัญหา LA16 (10x10) ซึ่งมีความแตกต่างจากค่าคำตอบที่ดีที่สุด 25 หน่วย ดังแสดงในตารางที่ 3
จากตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบค่าที่ได้จาก วิธี

HSA กับวิธี GA (Genetic Algorithm) และวิธี SA (Simulated Annealing) จากการเปรียบเทียบพบว่า ปัญหา FT06 ทุกวิธีการสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดพบ ปัญหา LA01 และ LA06 วิธี HSA และ SA สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดพบ ในขณะที่วิธี GA ไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดพบ ปัญหา LA11 วิธี HSA สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดพบ ในขณะที่วิธี GA ไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดพบ ส่วนปัญหา LA16 ทุกวิธีการไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดพบ แต่สามารถหาคำตอบได้เท่ากัน

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่าคำตอบที่ได้จากวิธีฮาร์โมนีเสิร์จกับค่าคำตอบที่ดีที่สุด คำคำตอบจาก GA และค่าคำตอบจาก SA

ปัญหาทดสอบ	FT06(6x6)	LA01(10x5)	LA06(15x5)	LA11(20x5)	LA16(10x10)
ค่าที่ดีที่สุด	55	666	926	1222	945
ค่าที่ได้จาก HSA	55	666	926	1222	979
ค่าที่ได้จาก GA					
(Kamrul, et al., 2007 และ Ren, et al., 2010)	55	794	987	1340	979
ค่าที่ได้จาก SA					
(Ren, et al., 2010)	55	666	926	-	979

สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ วิธีฮาร์โมนีเสิร์จได้ถูกประยุกต์ใช้กับปัญหารางการผลิตแบบทำตามสั่ง โดยทำการทดสอบกับปัญหาทดสอบจำนวนห้าปัญหาคือ FT06 (6 x 6), LA01 (10 x 5), LA06 (15 x 5), LA11 (20 x 5) และ LA16 (10 x 10) สำหรับการออกแบบการทดลองนั้นได้แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ การทดลองที่หนึ่ง จะทำการทดสอบหาค่าปัจจัยของวิธีฮาร์โมนีเสิร์จ โดยเลือกปัญหา LA11 (20 x 5) ซึ่งเป็นปัญหาที่มีขนาดใหญ่ เพื่อทำการทดสอบหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด และการทดลองที่สองทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าคำตอบที่ได้จากวิธีฮาร์โมนีเสิร์จกับค่าคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาทดสอบทั้งห้าปัญหาและเปรียบเทียบกับค่าคำตอบที่ได้จากวิธี GA และ SA ผลจากการทดสอบพบว่า ค่าปัจจัย HMS/NI และ HMCN มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในขณะที่ค่าปัจจัย PAR และ BW ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติและเมื่อพิจารณากราฟผลกระทบหลักสามารถสรุปได้ว่าควรกำหนดค่าปัจจัย HMS/NI, HMCN, PAR และ BW เท่ากับ 20/10000, 0.9, 0.1 และ 0.01 ตามลำดับ ในส่วนของการเปรียบเทียบค่าคำตอบที่ได้จากวิธีฮาร์โมนีเสิร์จกับค่าคำตอบที่ดีที่สุดนั้นพบว่า ปัญหาทดสอบ FT06 LA01 LA06 และ LA11 วิธีฮาร์โมนีเสิร์จสามารถหาคำคำตอบที่ดีที่สุดพบ ยกเว้นปัญหาทดสอบ LA16 ซึ่งไม่สามารถหาคำคำตอบที่ดีที่สุดพบ แต่สามารถหาคำคำตอบที่ใกล้เคียงพบ ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี GA และ SA พบว่า วิธี HSA สามารถหาคำคำตอบได้ดีกว่าวิธีการอื่น ๆ ดังนั้น จึงสามารถกล่าวได้ว่าวิธีฮาร์โมนีเสิร์จเป็นวิธีการที่น่าสนใจในการที่จะพัฒนาเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Artigues, C. & Feillet, D. (2007). A branch and bound method for the job-shop problem with sequence dependent setup times, *Annals of Operations Research*, vol. 159, pp. 135-159.
- Artigues, C. Huguet, M.-J. & Lopez, P. (2011). Generalized disjunctive constraint propagation for solving the job shop problem with time lags, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 24, pp. 220-231.
- Baker, K. R. (1974). *Introduction to Sequencing and Scheduling*, New York: Wiley and Sons.
- Baptiste, P. Flamini, M. & Sourd, F. (2008). Lagrangian bounds for just-in-time job-shop scheduling, *Computers & Operations Research*, vol. 35, pp. 906-915.
- Beasley, J. E. (1990). Or-library: Distributing test problems by electronic mail. *Journal of the Operational Research Society*, 14, 1069-1072.
- Chen, H. X. & Luh, P. B. (2003). An alternative framework to Lagrangian relaxation approach for job shop scheduling, *European Journal of Operational Research*, vol. 149, pp. 499-512.

- Dorigo, M. & Stutzle, T. (2004). *Ant Colony Optimization*, England: A Bradford Book, the MIT Press.
- Garey, M. R., Johnson, D. S., & Sethi, R. (1976). The complexity of flowshop and jobshop scheduling. *Mathematics of Operations Research*, 1, 117–129.
- Geem, Z.W. (2007). Optimal scheduling of multiple dam system using Harmony Search Algorithm, Sandoval, F. Prieto, A.G. Cabestany, J. Graña, M. (eds.) IWANN 2007. *LNCS*, Heidelberg, Springer, 4507, 316–323.
- Geem, Z.W., Kim, J.H. & Loganathan, G.V. (2001). A new heuristic optimisation algorithm: Harmony search. *Simulation*, 76, 60 – 68
- Geem, Z.W. Lee, K.S. & Park, Y.J. (2005). Application of Harmony Search to Vehicle Routing, *American Journal of Applied Sciences*, 2, 1552–1557.
- Gen, M. & Cheng, R. (1997). *Genetic Algorithms and Engineering Design*, New York: John Wiley and Sons.
- Glover, F., & Laguna, M. (1998). *Tabu search*. Kluwer Academic Publishers.
- Kamrul, H. S. M., Sarker, R. & Cornforth, D. (2007). Hybrid Genetic Algorithm for Solving Job-Shop Scheduling Problem, *International Conference on Computer and Information Science*, 519 – 524.
- Kennedy, J. & Eberhart, C, R. (2001). *Swarm Intelligence*, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
- Lee, K.S. & Geem, Z.W. (2004). A new structural optimization method based on the Harmony Search Algorithm, *Computers and Structures*, 82, 781–798.
- Montgomery, D. C. (2001). *Design and Analysis of Experiments* (5th ed.). New York: Wiley and Sons.
- Ren, Qing-dao-er-ji. Wang, Y. & Si, X. (2010). An Improved Genetic Algorithm for Job Shop Scheduling Problem, *International Conference on Computational Intelligence and Security*, 113 – 116.
- Xu, H. Gao, X.Z. Wang, T. & Xue, K. (2010). Harmony Search Optimization Algorithm: Application to a Reconfigurable Mobile Robot Prototype, *Recent Advances in Harmony Search Algorithm*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Yang, X. S. (2008). *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*. United Kingdom: Luniver Press.