การจัดตารางการซ้อมดนตรีสำหรับปัญหาขนาดใหญ่

นายนพปฎล สกุลสม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
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 Graduate School.

MUSIC REHEARSAL SCHEDULING FOR A LARGE SCALE PROBLEM

Mr. Noppadon Sakulsom

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจัดตารางการซ้อมดนตรีสำหรับปัญหาขนาดใหญ่
โดย	นายนพปฎล สกุลสม
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปวีณา เชาวลิตวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดาริชา สุธีวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.นันทชัย กานตานันทะ)

นพปฏล สกุลสม : การจัดตารางการซ้อมดนตรีสำหรับปัญหาขนาดใหญ่. (MUSIC REHEARSAL SCHEDULING FOR A LARGE SCALE PROBLEM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ, 114 หน้า.

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการจัดตารางซ้อมดนตรี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อจัดสรรเพลงสำหรับการซ้อมในแต่ละวันเพื่อให้มีจำนวนวันโดยรวมที่นักดนตรีแต่ละคนต้องมาสถานที่ซ้อมน้อยที่สุด และจัดลำดับเพลงเพื่อให้เวลาทั้งหมดที่นักดนตรีอยู่ในสถานที่ซ้อมโดยที่ไม่ได้ทำการซ้อมมีค่าน้อยที่สุด

เนื่องจากความซับซ้อนของปัญหาทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวใช้เวลาในการหาคำตอบเพิ่มขึ้นอย่างมากในการหาคำตอบเมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น จึงเกิดแนวคิดในการ แบ่งปัญหาออกเป็น 2 ส่วน โดยใช้วิธีการฮิวริสติกส์ซึ่งพัฒนาขึ้นจากวิธีการออกแบบการผลิตแบบเซลล์จัดสรรเพลงสำหรับการซ้อมในแต่ละวันและแบ่งปัญหาเดิมซึ่งมีการซ้อมหลายวันออกเป็นปัญหาย่อยๆปัญหาละ 1 วัน จากนั้นจึงใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จัดลำดับเพลงสำหรับปัญหาย่อยเหล่านั้น

การทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอกระทำโดยการเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของวิธีการที่นำเสนอกับค่าคำตอบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าจากการทดสอบ 150 ปัญหา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบคำตอบที่ดีที่สุด 137 ปัญหาและ 13 ปัญหาไม่พบคำตอบที่ดีที่สุดภายในเวลา 2 ชั่วโมงในกรณีที่ทุกเพลงมีความยาวเท่ากันและ 12 ชั่วโมงในกรณีที่เพลงมีความยาวแตกต่างกัน โดยวิธีการที่นำเสนอพบคำตอบที่ดีกว่าหรือดีเทียบเท่ากับคำตอบจากแบบจำลองในทุกปัญหา

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2554 .....

5270342721 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : SCHEDULING/ MUSIC REHEARSAL/ INTEGER PROGRAMMING/ MODEL/ CELL FORMATION

NOPPADON SAKULSOM : MUSIC REHEARSAL SCHEDULING FOR A LARGE SCALE PROBLEM. ADVISOR: ASST.PROF. WIPAWEE THARMMAPHORNPHILAS, Ph.D., 114 pp.

This research focuses on developing rehearsal scheduling of a music band with 2 objectives. The first objective is to assign music pieces into rehearsal days to minimize the total number of days that players must be in the and the second is to sequence music pieces during a day to minimize the total waiting time of the players.

Because of the complexity of the problem, the computational time for an integer programming model developed to solve this problem grows rapidly as the problem's size increases. Therefore, a heuristic algorithm based on a cell formation technique is developed to assign music pieces into rehearsal days to separate the large problem with many rehearsal days into many small single day problems. Then, the integer programming model is used to sequence music pieces of those small problems.

To evaluate the proposed methodology, the solutions from the proposed heuristics are compared to the solutions from an integer programming model. The integer programming model found 137 optimal solutions. It cannot obtain the optimal solutions of 13 problems within 2 hours in case of equal music pieces length and 12 hours in case of unequal music piece length. The proposed methodology provides as good as or better solutions for all problems

Department : Industrial Engineering Student's Signature .....

Field of Study : Industrial Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2011

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความเมตตาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาอันมีค่าให้คำแนะนำ และแนวทางการแก้ไขปัญหาระหว่างการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี ให้อิสระในการทำงาน ตลอดจนให้แนวคิด คติเตือนใจแต่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปวีณา เชาวลิตวงศ์ ประธานกรรมการสอบ, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดาริชา สุธีวงศ์ กรรมการสอบ และ ดร.นันทชัย กานตานันทะ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้สละเวลาพิจารณาวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณคุณรวิรธร วะทาและเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่มิได้กล่าวไว้ในที่นี้ที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฌ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 4

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 5

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 5

1.5 ระยะเวลาดำเนินงาน 6

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 8

2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการซ้อมดนตรี 8

2.2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการผลิต 9

2.3 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตแบบเซลลูลาร์ 13

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัยกรณีที่ทุกเพลงมีความยาวเท่ากัน 23

3.1 ลักษณะของปัญหาที่ทำการศึกษา 23

3.1.1 ปัญหาของวงดนตรีกรณีศึกษา 23

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 25

3.3 วิธีการที่นำเสนอ 31

3.3.1 วิธีการทางฮิวริสติกส์สำหรับจัดเพลงลงวันซ้อม 32

หน้า

3.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับจัดลำดับเพลงภายในการซ้อมแต่ละวัน 39
3.4 ผลการวิจัย 43

บทที่ 4 วิธีการดำเนินงานวิจัยและผลวิจัยกรณีที่เพลงมีความยาวแตกต่างกัน 47
4.1 ลักษณะของปัญหาที่ทำการศึกษา 47
4.1.1 ปัญหาของวงดนตรีกรณีศึกษา 47
4.2 แบบจำลองทางคณิศาสตร์ 49
4.3 วิธีการที่นำเสนอ 56
4.3.1 วิธีการทางฮิวริสติกส์สำหรับจัดเพลงลงวันซ้อม 57
4.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับจัดลำดับเพลงภายในการซ้อมแต่ละวัน 62
4.4 ผลการวิจัย 67
4.4.1 ผลการหาคำตอบสำหรับปัญหาทั้งสองส่วนด้วยวิธีการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 67
4.4.2 ผลการหาคำตอบสำหรับปัญหาส่วนที่สองด้วยวิธีการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาขนาดเล็กหลายปัญหา 72

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 80
6.1 สภาพปัญหา วิธีการแก้ไขและข้อจำกัดของระเบียบวิธี 80
6.4 ข้อเสนอแนะ 82

รายการอ้างอิง 83

ภาคผนวก 86
ภาคผนวก ก ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการฮิวริสติกส์ 87

หน้า

ภาคผนวก ข ผลการทดสอบ ค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และ ค่าจากวิธีการที่นำเสนอ 97

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 114

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ข้อมูลการซ้อมจากปัญหาของ Smith(2003)	2
1.2	ผลคำตอบจากแบบจำลองของ Smith (2003)	3
1.3	การจัดเรียงการซ้อมสองวันโดยยึดตามแบบจำลองของ Smith(2003)	4
1.4	การจัดเรียงการซ้อมสองวันโดยยึดตามแบบจำลองซึ่งปรับเปลี่ยนแล้ว	4
1.5	ระยะเวลาในการวิจัย	6
2.1	ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางซ้อมดนตรี	19
2.2	ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการผลิตของระบบเครื่องจักรขนาน	20
2.3	ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตแบบเซลลูลาร์	22
3.1	ตัวอย่างตารางความสัมพันธ์ระหว่างเพลงและนักดนตรี	24
3.2	ตัวอย่างสำหรับตัวแปร a_{dki} , l_{dki} และ r_{dki}	29
3.3	ตัวอย่างสำหรับตัวแปร $replay_{dki}$, r_{dki} และ w_{dki}	30
3.4	ตัวอย่างตารางหลังการสลับค่า	33
3.5	ตัวอย่างตารางแสดงค่าความใกล้ชิด	35
3.6	ค่าสัมประสิทธิ์ของนักดนตรีหลังจัดเพลงที่ 1, 8, 11 และ 13 ลงในตาราง	36
3.7	ค่าสัมประสิทธิ์ของนักดนตรีหลังจัดเพลงที่ 1, 8, 11, 13 และ 4 ลงในตาราง	37
3.8	ผลการจัดตารางโดยวิธีการทางฮิวริสติกส์	37
3.9	ผลการจัดตารางโดยไม่คำนึงถึงสัมประสิทธิ์ของนักดนตรี	38
3.10	ผลการจัดตารางโดยอ้างอิงจากค่าความใกล้ชิดเท่านั้น	38
3.11	ผลการวิจัยโดยเปรียบเทียบระหว่างค่าวัตถุประสงค์และเวลาในการหาคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาส่วนแรก	44
3.12	ผลการวิจัยโดยเปรียบเทียบระหว่างเวลาในการหาคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาทั้งสองส่วน	45
3.13	ผลการวิจัยโดยเปรียบเทียบระหว่างค่าวัตถุประสงค์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาทั้งสองส่วน	46
4.1	ตัวอย่างตารางความสัมพันธ์ระหว่างเพลงและนักดนตรี	49

ตารางที่ หน้า

4.2 ตัวอย่างสำหรับตัวแปร $timestart_{dij}$, $timeend_{dij}$ และ $timetable_{dij}$ 53

4.3 ตัวอย่างตารางหลังการสลับค่า 57

4.4 ตัวอย่างตารางแสดงค่าความใกล้ชิด 59

4.5 ค่าความใกล้ชิดในกรณีที่เปลี่ยนเพลงที่ 11 ออกจากวันซ้อม 61

4.6 ค่าความใกล้ชิดสำหรับพิจารณาการสลับเพลงระหว่างวันซ้อม 61

4.7 ผลการวิจัยโดยเปรียบเทียบระหว่างค่าวัตถุประสงค์และเวลาในการหาคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาส่วนแรก 69

4.8 ผลการวิจัยโดยเปรียบเทียบระหว่างเวลาในการหาคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาทั้งสองส่วน 70

4.9 ผลการวิจัยโดยเปรียบเทียบระหว่างค่าวัตถุประสงค์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาทั้งสองส่วน 71

4.10 ผลการหาคำตอบสำหรับปัญหาส่วนที่สองด้วยวิธีการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาขนาดเล็กหลายปัญหาสำหรับปัญหาที่มี 10 เพลง ผู้เล่น 5 คน และแบ่งวันซ้อมออกเป็น 2 วัน 73

4.11 ผลการหาคำตอบสำหรับปัญหาส่วนที่สองด้วยวิธีการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาขนาดเล็กหลายปัญหาสำหรับปัญหาที่มี 12 เพลง ผู้เล่น 5 คน และแบ่งวันซ้อมออกเป็น 2 วัน 74

4.12 ผลการหาคำตอบสำหรับปัญหาส่วนที่สองด้วยวิธีการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาขนาดเล็กหลายปัญหาสำหรับปัญหาที่มี 14 เพลง ผู้เล่น 5 คน และแบ่งวันซ้อมออกเป็น 2 วัน 75

4.13 ผลการหาคำตอบสำหรับปัญหาส่วนที่สองด้วยวิธีการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาขนาดเล็กหลายปัญหาสำหรับปัญหาที่มี 10 เพลง ผู้เล่น 5 คน และแบ่งวันซ้อมออกเป็น 3 วัน 76

4.14 ผลการหาคำตอบสำหรับปัญหาส่วนที่สองด้วยวิธีการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาขนาดเล็กหลายปัญหาสำหรับปัญหาที่มี 12 เพลง ผู้เล่น 5 คน และแบ่งวันซ้อมออกเป็น 3 วัน 77

ตารางที่ หน้า

4.15 ผลการหาคำตอบสำหรับปัญหาส่วนที่สองด้วยวิธีการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาขนาดเล็กหลายปัญหาสำหรับปัญหาที่มี 14 เพลง ผู้เล่น 5 คน และแบ่งวันซ้อมออกเป็น 3 วัน 78
4.16 ผลการหาคำตอบสำหรับปัญหาส่วนที่สองด้วยวิธีการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาขนาดเล็กหลายปัญหาสำหรับปัญหาที่มี 16 เพลง ผู้เล่น 5 คน และแบ่งวันซ้อมออกเป็น 3 วัน 79
ก-1 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากันชุดที่ 1 88
ก-2 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากันชุดที่ 2 89
ก-3 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากันชุดที่ 3 89
ก-4 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากันชุดที่ 4 90
ก-5 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากันชุดที่ 5 90
ก-6 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากันชุดที่ 6 91
ก-7 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากันชุดที่ 7 91
ก-8 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากันชุดที่ 8 92
ก-9 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากันชุดที่ 9 92
ก-10 งตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากันชุดที่ 10 93
ก-11 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกันชุดที่ 1 93
ก-12 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกันชุดที่ 2 94
ก-13 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกันชุดที่ 3 94
ก-14 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกันชุดที่ 4 94
ก-15 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกันชุดที่ 5 95
ก-16 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกันชุดที่ 6 95
ก-17 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกันชุดที่ 7 95
ก-18 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกันชุดที่ 8 96
ก-19 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกันชุดที่ 9 96
ก-20 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกันชุดที่ 10 96
ข-1 เวลาในการหาคำตอบในปัญหาส่วนแรกด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์กรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากัน 98

ตารางที่		หน้า
ข-2	ค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาส่วนแรกซึ่งหาด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์กรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากัน	99
ข-3	เวลาในการหาคำตอบในปัญหาส่วนแรกด้วยวิธีการฮิวริสติกส์กรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากัน	100
ข-4	ค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาส่วนแรกซึ่งหาด้วยวิธีการฮิวริสติกส์กรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากัน	101
ข-5	เวลาในการหาคำตอบในปัญหาส่วนที่สองด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์กรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากัน	102
ข-6	ค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาส่วนที่สองซึ่งหาด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์กรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากัน	103
ข-7	เวลาในการหาคำตอบในปัญหาส่วนที่สองด้วยวิธีการที่นำเสนอกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากัน	104
ข-8	ค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาส่วนที่สองซึ่งหาด้วยวิธีการที่นำเสนอกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากัน	105
ข-9	เวลาในการหาคำตอบในปัญหาส่วนแรกด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์กรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกัน	106
ข-10	ค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาส่วนแรกซึ่งหาด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์กรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกัน	107
ข-11	เวลาในการหาคำตอบในปัญหาส่วนแรกด้วยวิธีการฮิวริสติกส์กรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกัน	108
ข-12	ค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาส่วนแรกซึ่งหาด้วยวิธีการฮิวริสติกส์กรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกัน	109
ข-13	เวลาในการหาคำตอบในปัญหาส่วนที่สองด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์กรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกัน	110
ข-14	ค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาส่วนที่สองซึ่งหาด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์กรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกัน	111
ข-15	เวลาในการหาคำตอบในปัญหาส่วนที่สองด้วยวิธีการที่นำเสนอกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกัน	112

ตารางที่ หน้า

ข-16 ค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาส่วนที่สองซึ่งหาด้วยวิธีการที่นำเสนอกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกัน 113

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ค่า ME ของรูปแบบการจัดการผลิตแบบต่างๆ (McCormick และคณะ (1972))	15
2.2	ลักษณะการเข้ารหัสโครโมโซมของ Wu และคณะ (2007)	18
3.1	จำนวนเพลงและเวลาที่ใช้ในการแก้ปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	32

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ก่อนการแสดงคอนเสิร์ตครั้งหนึ่ง วงดนตรีจะต้องทำการซ้อมบทเพลงซึ่งใช้บรรเลงในคอนเสิร์ตนั้นหลายครั้งและการซ้อมจะแบ่งออกเป็นหลายวัน โดยทั่วไปแล้วบทเพลงแต่ละเพลงจะบรรเลงโดยนักดนตรีแตกต่างกันตามแต่ชนิดและจำนวนเครื่องดนตรีที่มีส่วนร่วมในเพลงนั้น ผู้ที่ทำหน้าที่จัดตารางการซ้อมของวงดนตรีจะต้องเลือกเพลงสำหรับทำการซ้อมและเรียงลำดับเพลงที่ทำการซ้อมในแต่ละวัน โดยมีเงื่อนไขในการซ้อมคือนักดนตรีจะต้องมาถึงสถานที่ซ้อมก่อนเพลงที่ตนร่วมบรรเลงเริ่มทำการซ้อม และกลับออกจากสถานที่ซ้อมได้หลังจากเพลงสุดท้ายที่ตนร่วมบรรเลงในวันนั้นทำการซ้อมเสร็จสิ้นแล้ว ดังนั้นหากนักดนตรีคนใดมีเพลงที่ตนร่วมบรรเลงสองเพลงในการซ้อมวันหนึ่ง ตารางการซ้อมที่ดีที่สุดสำหรับนักดนตรีคนดังกล่าวคือตารางซึ่งจัดให้เพลงทั้งสองทำการซ้อมใกล้กันที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้นักดนตรีมีเวลาที่ต้องอยู่ในสถานที่ซ้อมแต่ไม่ได้ทำการซ้อมน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาในด้านของนักดนตรีแล้วพบว่าการจัดตารางซ้อมของวงดนตรีนั้น การจัดสรรเพลงสำหรับการซ้อมแต่ละวันและการเรียงลำดับเพลงที่ทำการซ้อมจะมีความสัมพันธ์กับนักดนตรีทุกคน ทั้งในด้านจำนวนวันที่ต้องเข้าร่วมการซ้อม ช่วงเวลาที่ต้องอยู่ในสถานที่ซ้อม และเวลาที่ต้องใช้ในการรอซ้อมในขณะที่วงทำการซ้อมเพลงที่ตนไม่ได้เข้าร่วมของนักดนตรีแต่ละคน ทำให้การจัดตารางซ้อมของวงดนตรีซึ่งมีนักดนตรีจำนวนมากนั้นมีความซับซ้อนค่อนข้างมากเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงลำดับของเพลงแม้เพียงเพลงเดียวจะส่งผลกระทบต่อนักดนตรีทุกคน ซึ่งหากเรียงลำดับเพลงที่ทำการซ้อมไม่ดีแล้วจะทำให้นักดนตรีต้องเข้าร่วมการซ้อมบ่อยเกินจำเป็นซึ่งยิ่งมีจำนวนวันที่นักดนตรีต้องเข้าร่วมการซ้อมมากเท่าไร ค่าใช้จ่ายจากค่าจ้างก็ยิ่งเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น และการเรียงลำดับเพลงที่ไม่ดีนั้นยังทำให้นักดนตรีใช้เวลาในการรอซ้อมในขณะที่วงทำการซ้อมเพลงที่ตนไม่ได้เข้าร่วมซึ่งนอกจากจะเป็นการเสียค่าจ้างโดยเปล่าประโยชน์แล้วยังทำให้นักดนตรีไม่พอใจอีกด้วย จึงเกิดความคิดในการใช้สมการคณิตศาสตร์ในการจัดตารางซ้อม

ปัญหาด้านการจัดตารางซ้อมของวงดนตรีนั้น Smith (2003) และ Gregory และคณะ (2004) ได้ศึกษาการซ้อมของวงออร์เคสตร้าเพื่อหาตารางซ้อมที่มีผลรวมของเวลาที่นักดนตรีต้องรอโดยที่ไม่ได้ทำการซ้อมน้อยที่สุด ทั้งนี้ปัญหาของ Smith (2003) นั้นเป็นปัญหาซึ่งปรับเปลี่ยนเงื่อนไขมาจากปัญหาการจัดตารางสำหรับถ่ายทำภาพยนตร์ซึ่ง Cheng และคณะ (1993) ได้

ทำการศึกษาการจัดตารางการถ่ายทำภาพยนต์นอกสถานที่โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้มีต้นทุนจากค่าตัวนักแสดงซึ่งต้องอยู่ในกองถ่ายโดยที่ไม่ได้เข้าฉากที่ถ่ายทำขณะนั้นน้อยที่สุด แต่ปัญหาของ Smith (2003) และปัญหาของ Cheng (1993) นั้นมีความแตกต่างกันตรงที่ในปัญหาของ Cheng (1993) นั้นถือว่าแต่ละ slot มีระยะเวลาเท่ากันคือ 1 วันและนักแสดงแต่ละคนมีค่าตัวแตกต่างกัน แต่ปัญหาของ Smith (2003) นั้นถือว่าเวลาในแต่ละ slot เวลานั้นไม่เท่ากัน แต่จะขึ้นอยู่กับความยาวของเพลงที่ทำการซ้อมใน slot นั้นๆ และคำนึงถึงผลรวมของเวลาที่นักดนตรีต้องรอโดยไม่ได้ทำการซ้อมเท่านั้น ไม่คำนึงถึงค่าตัวของนักดนตรีแต่ละคน

เมื่อพิจารณาปัญหาของ Cheng และคณะ (1993) และปัญหาของ Smith (2003) แล้วพบว่าลักษณะการจัดตารางของปัญหาทั้งสองนั้น เป็นการจัดตารางโดยเรียงลำดับงานที่ทำอย่างต่อเนื่อง งานทั้งหมดมีการดำเนินการต่อเนื่องกันตั้งแต่งานแรกจนถึงงานสุดท้าย แตกต่างจากปัญหาของวงดนตรีที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ซึ่งแบ่งการซ้อมออกเป็นหลายวัน ซึ่งการหาคำตอบด้วยแนวคิดของ Cheng และคณะ (1993) และ Smith (2003) นั้นจะให้คำตอบที่คลาดเคลื่อนจากคำตอบที่ดีที่สุดได้ เช่น จากตัวอย่างปัญหาของ Smith (2003) ซึ่งเป็นการจัดตารางสำหรับนักดนตรี 5 คนซ้อมเพลง 9 เพลง โดยแต่ละเพลงมีความยาวและนักดนตรีที่เข้าร่วมดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ข้อมูลการซ้อมจากปัญหาของ Smith(2003)

piece	1	2	3	4	5	6	7	8	9
player 1	1	1	0	1	0	1	1	0	1
player 2	1	1	0	1	1	1	0	1	0
player 3	1	1	0	0	0	0	1	1	0
player 4	1	0	0	0	1	1	0	0	1
player 5	0	0	1	0	1	1	1	1	0
duration	2	4	1	3	3	2	5	7	6

หากจัดเรียงเพื่อให้นักดนตรีมีเวลาที่ต้องรอโดยที่ไม่ได้ทำการซ้อมน้อยที่สุดจะได้คำตอบคือ 17 หน่วย ดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 ผลคำตอบจากแบบจำลองของ Smith(2003)

piece	3	8	2	7	1	5	6	4	9
player 1	0	0	1	1	1	0	1	1	1
player 2	0	1	1	0	1	1	1	1	0
player 3	0	1	1	1	1	0	0	0	0
player 4	0	0	0	0	1	1	1	0	1
player 5	1	1	0	1	0	1	1	0	0
duration	1	7	4	5	2	3	2	3	6

ซึ่งหากแบ่งการซ้อมออกเป็นสองวัน เพื่อให้จำนวน slot เพียงพอกับความยาวเพลง โดยรวม 33 หน่วยจะกำหนดให้แต่ละวันมีเวลาในการซ้อมไม่เกิน 17 slot จะได้ผลรวม slot ทั้งสองวันเท่ากับ 34 (กำหนดให้ทุก slot เท่ากับ 1 หน่วยเวลา ดังนั้นหากเพลงมีความยาว a หน่วยเพลงนั้นก็จะซ้อมบน slot ทั้งหมด a slot ติดต่อกัน เป็นต้น) จะพบว่า หากจัดเรียงการซ้อมตามคำตอบเดิมจะได้จำนวนวันโดยรวมที่นักดนตรีต้องเข้าร่วมการซ้อมเท่ากับ 9 (นั่นคือมีนักดนตรี 4 คนที่เข้าร่วมการซ้อมทั้ง 2 วันและนักดนตรี 1 คนที่เข้าร่วมการซ้อมเพียง 1 วัน) และได้เวลาที่นักดนตรีรอโดยไม่ได้ทำการซ้อมเท่ากับ 10 หน่วย ดังตารางที่ 1.3 ในขณะที่หากจัดเรียงการซ้อมตามคำตอบที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ซึ่งปรับเปลี่ยนให้เข้ากับรูปแบบปัญหาที่มีการแบ่งการซ้อมออกเป็นหลายวันแล้ว จะได้จำนวนวันที่เข้าร่วมการซ้อมโดยรวมเท่ากับ 9 เท่ากัน แต่ได้เวลาที่นักดนตรีรอโดยไม่ได้ทำการซ้อมเท่ากับ 7 หน่วยเท่านั้น ดังตารางที่ 1.4

งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการหาคำตอบของการจัดตารางนี้มีความยุ่งยากในการหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) เนื่องจากปัญหาลักษณะนี้เป็นปัญหาแบบ NP-Hard (Cheng (1993)) ทำให้การแก้ปัญหาด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดจะต้องใช้เวลาประมวลผลเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อตัวแปรซึ่งใช้ในการคำนวณหาคำตอบเพิ่มขึ้น โดยการประมวลผลอาจใช้เวลานานหลายชั่วโมงหรือหลายวัน ซึ่งไม่เหมาะสมในการนำมาใช้งานจริง ดังนั้น วิธีการฮิวริสติกส์จึงถูกนำมาใช้ เพื่อลดความซับซ้อนของกระบวนการหาคำตอบและลดเวลาในการหาคำตอบเช่นกัน

ตารางที่ 1.3 การจัดเรียงการซ้อมสองวันโดยยึดตามแบบจำลองของ Smith(2003)

	day 1					day 2				
piece	3	8	2	7		1	5	6	4	9
player 1	0	0	1	1		1	0	1	1	1
player 2	0	1	1	0		1	1	1	1	0
player 3	0	1	1	1		1	0	0	0	0
player 4	0	0	0	0		1	1	1	0	1
player 5	1	1	0	1		0	1	1	0	0
duration	1	7	4	5		2	3	2	3	6

ตารางที่ 1.4 การจัดเรียงการซ้อมสองวันโดยยึดตามแบบจำลองซึ่งปรับเปลี่ยนแล้ว

	day 1					day 2				
piece	3	8	2	7		4	5	6	1	9
player 1	0	0	1	1		1	0	1	1	1
player 2	0	1	1	0		1	1	1	1	0
player 3	0	1	1	1		0	0	0	1	0
player 4	0	0	0	0		0	1	1	1	1
player 5	1	1	0	1		0	1	1	0	0
duration	1	7	4	5		3	3	2	2	6

1.2 **วัตถุประสงค์ของงานวิจัย**

พัฒนาวิธีการจัดตารางซ้อมดนตรีเพื่อ

1. เพื่อลดจำนวนวันที่ต้องเข้าร่วมการซ้อมโดยรวมของนักดนตรี
2. เพื่อลดเวลาที่ต้องใช้ในการรอซ้อมโดยรวมของนักดนตรี

1.3 ขอบเขตและข้อสมมุติของงานวิจัย

1. ข้อมูลต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นข้อมูลที่ถูกจำลองขึ้นมา และเป็นข้อมูลที่ทราบแน่นอนล่วงหน้า (Deterministic) ได้แก่
   - จำนวนนักดนตรี
   - จำนวนเพลงที่บรรเลง
   - ระยะเวลาและจำนวนวันที่ต้องการในการซ้อมของเพลงแต่ละเพลง
   - เพลงที่นักดนตรีแต่ละคนร่วมบรรเลงในคอนเสิร์ต
   - จำนวนครั้งที่ทำการซ้อมร่วมกันของนักดนตรีมากที่สุดที่ทำได้
2. ข้อสมมติฐานในงานวิจัย
   - เวลาในการเตรียมสถานที่ซ้อมรวมอยู่ในเวลาซ้อมของแต่ละเพลงแล้ว
   - กำหนดให้นักดนตรีมีความพร้อมทำการซ้อมหลังจากมาถึงสถานที่ซ้อมทันที
   - ไม่คำนึงถึงผลกระทบจากความเหนื่อยล้าในการซ้อมของนักดนตรี
   - ลำดับเพลงในการซ้อมไม่มีผลต่อระยะเวลาที่ต้องการในการซ้อมของเพลง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ศึกษาวิธีการใช้งานโปรแกรม CPLEX, ILOG OPL และ MATLAB
3. ระบุที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย รวมถึงข้อสมมติฐานต่างๆ
4. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model)
5. ประมวลผลโดยซอฟต์แวร์ CPLEX เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal solution)
6. สร้างวิธีการฮิวริสติกส์ (Heuristics) สำหรับแก้ปัญหา โดยใช้โปรแกรม MATLAB
7. เปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากวิธีฮิวริสติก (Heuristic) กับคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution)
8. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย
9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ระยะเวลาดำเนินงาน

ตารางที่ 1.5 ระยะเวลาในการวิจัย

กิจกรรม	2553						2554												2555
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.
1. ศึกษาทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย																			
21. ศึกษาวิธีการใช้งานโปรแกรม CPLEX, ILOG OPL																			
2.2. ศึกษาวิธีการใช้งานโปรแกรมMATLAB																			
3. ระบุที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน																			
4. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model)																			
5. ประมวลผลโดยซอฟต์แวร์ CPLEX เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด																			
6. สร้างกระบวนการฮิวริสติก (Heuristic) สำหรับแก้ปัญหา																			
7. เปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากฮิวริสติกกับคำตอบที่ดีที่สุด																			
8. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย																			
9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์																			

เนื้อหาสำหรับงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 5 บท ได้แก่ บทที่ 1 นี้ซึ่งกล่าวถึงภาพรวมของงานวิจัย จากนั้นบทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ได้แก่ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการซ้อมดนตรี ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรขนาน และ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตแบบเซลลูลาร์ บทที่ 3 และ 4 จะกล่าวถึงรายละเอียดและขั้นตอนในการวิจัย แนวคิดในการพัฒนาวิธีการจัดตารางการซ้อมดนตรี รวมถึงผลการวิจัย โดยวิธีการจัดตารางซ้อมดนตรีแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนแรกเป็นการจัดสรรเพลงสำหรับการซ้อมในแต่ละวันเพื่อให้มีจำนวนวันโดยรวมที่นักดนตรีแต่ละคนต้องมาสถานที่ซ้อมน้อยที่สุดโดยใช้วิธีการฮิวริสติกส์ และส่วนที่สองใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อหาการจัดลำดับเพลงเพื่อให้เวลาทั้งหมดที่นักดนตรีอยู่ในสถานที่ซ้อมแต่ที่ไม่ได้ทำการซ้อมมีค่าน้อยที่สุด โดยบทที่ 3 ศึกษาปัญหาในกรณีที่เพลงทุกเพลงมีความยาวเท่ากัน และบทที่ 4 ศึกษาปัญหาในกรณีที่เพลงมีความยาวแตกต่างกัน และบทที่ 5 บทสุดท้ายจะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย รวมถึงข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไปในอนาคต

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางซ้อมดนตรีโดยส่วนนี้รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางสำหรับถ่ายทำภาพยนต์ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับการจัดตารางซ้อมดนตรีอย่างมาก ส่วนที่สองได้แก่ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการผลิตของระบบเครื่องจักรขนาน เนื่องจากการจัดสรรเพลงให้แก่การซ้อมแต่ละวันมีลักษณะคล้ายคลึงกับการจัดสรรงานให้แก่ระบบการผลิตซึ่งประกอบด้วยเครื่องจักรขนานเหมือนกันทุกประการ และส่วนสุดท้ายได้แก่ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตแบบเซลลูลาร์โดยการจัดสรรให้เครื่องจักรซึ่งผลิตชิ้นส่วนเดียวกันอยู่ในกลุ่มเดียวกันของการผลิตแบบเซลลูลาร์นั้น มีลักษณะเหมือนกับการพยามยามจัดให้เพลงซึ่งบรรเลงโดยนักดนตรีกลุ่มเดียวกันทำการซ้อมในวันเดียวกัน

2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการซ้อมดนตรี

Smith (2003) และ Gregory และคณะ (2004) ได้ศึกษาการซ้อมของวงออร์เคสตร้าเพื่อหาตารางซ้อมที่มีผลรวมของเวลาที่นักดนตรีต้องรอโดยที่ไม่ได้ทำการซ้อมน้อยที่สุด โดย Smith (2003) แบ่งเวลาที่ทำการซ้อมออกเป็น slot เท่าจำนวนเพลงที่ทำการซ้อมแล้วนำเพลงมาเรียงใส่ slot แล้วหาผลรวมของเวลาในการรอของนักดนตรีเพื่อหารูปแบบการจัดเรียงเพลงที่ให้ผลรวมของเวลาที่นักดนตรีต้องรอในสถานที่ซ้อมโดยที่ไม่ได้ทำการซ้อมน้อยที่สุด จากนั้น Gregory และคณะ (2004) นำแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ Smith (2003) มาปรับปรุงโดยยึดแนวคิดการแก้ปัญหาแบบเดิม แล้วพิสูจน์ประสิทธิภาพของแบบจำลองใหม่ด้วยการเปรียบเทียบเวลาในการหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยกว่าแบบจำลองแบบเก่า โดยก่อนหน้านี้ปัญหาซึ่งเป็นต้นแบบของปัญหาการจัดตารางซ้อมดนตรีคือปัญหาการจัดตารางสำหรับถ่ายทำภาพยนตร์ดังที่ได้กล่าวมานั้น Cheng และคณะ (1993) ได้ทำการศึกษาการจัดตารางการถ่ายทำภาพยนต์นอกสถานที่โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้มีต้นทุนจากค่าตัวนักแสดงซึ่งต้องอยู่ในกองถ่ายโดยที่ไม่ได้เข้าฉากที่ถ่ายทำขณะนั้นน้อยที่สุด โดยแก้ปัญหาด้วยวิธีแตกกิ่งและจำกัดเขต แต่พบว่าการที่ปัญหาเป็นปัญหาประเภท strongly NP-hard ซึ่งการแก้ปัญหาประเภทนี้ด้วยวิธีแตกกิ่งและจำกัดเขตนั้นจะใช้เวลามากในการแก้ปัญหา จึงพัฒนฮิวริสติกส์ในการหาคำตอบ โดยเริ่มต้นด้วยการหา Most attractive route นั่นคือเริ่มต้นการถ่ายทำด้วยฉากใดฉากหนึ่งแล้วคำนวณหาฉาก

ต่อไปที่มีค่าตัวนักแสดงที่ไม่ได้เข้าฉากน้อยที่สุดต่อไปเรื่อยๆ คล้ายกับการหาเส้นทางสำหรับปัญหา Travelling Salesperson ด้วยวิธี nearest neighbor จากนั้น Cheng และคณะ (1993) ปรับปรุงคำตอบด้วยการสลับคำตอบที่อยู่ติดกัน (pairwise interchange) หากได้คำตอบที่ดีขึ้นจึงแทนที่คำตอบเดิมด้วยคำตอบใหม่ จากนั้น Garcia de la Banda และคณะ (2011) ทำการปรับปรุงวิธีการจัดตารางของ Cheng และคณะ (1993) โดยการประยุกต์ใช้ dynamic programming ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาขนาดใหญ่ได้รวดเร็วกว่าวิธีที่พัฒนามาก่อนโดย Cheng และคณะ (1993) และ Smith (2003)

2.2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการผลิต

"การจัดตาราง (Scheduling) เป็นกระบวนการตัดสินใจอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อทั้งอุตสาหกรรมการผลิตและอุตสาหกรรมการบริการ โดยที่ผลลัพธ์ของกระบวนการในที่นี้คือตารางหรือกำหนดการ (Schedule) สำหรับกิจกรรมต่างๆ"

" "การจัดตาราง" หมายถึงการจัดสรรทรัพยากร (Resource) ที่มีอยู่อย่างจำกัดให้กับภารกิจจำนวนหนึ่ง ภายใต้ระยะเวลาที่กำหนดให้ เพื่อที่จะทำให้องค์กรสามารถบรรลุถึงเป้าหมาย (Goal) หรือวัตถุประสงค์ (Objectives) สูงสุดที่องค์กรกำหนดเอาไว้ที่เวลานั้นได้" (ปารเมศ (2546))

สำหรับปัญหาเริ่มแรกนั้น Cheng และคณะ (1993) เห็นว่าปัญหาการจัดตารางการถ่ายทำภาพยนต์นอกสถานที่ ที่ศึกษานั้นมีลักษณะคล้ายคลึงกับปัญหา Project Scheduling แต่มีลักษณะที่แตกต่างที่สำคัญ 2 ประการคือ ข้อแรกคือปัญหาของ Cheng และคณะ (1993) พิจารณาการจัดตารางของนักแสดงแต่ละคน ในขณะที่ปัญหา Project Scheduling ทั่วไปนั้นพิจารณาการจัดตารางของงานแต่ละงานในโครงการซึ่งอาจมีความต้องการจำนวนพนักงานแต่ละประเภทแตกต่างกัน (เช่น งานในด้านการวิจัย ต้องการนักฟิสิกส์ 3 คน และต้องการนักเคมี 2 คน เป็นต้น) ความแตกต่างประการที่สอง คือแนวคิดในการลดต้นทุนเนื่องจากวันว่างของนักแสดง เนื่องจากตามปกติแล้วการจัดตารางการทำงานจะคำนึงถึงการลดต้นทุนที่เกิดจากการปล่อยให้เครื่องจักรเดินเปล่า ซึ่งวิธีการจัดตารางเหล่านี้แตกต่างจากปัญหาของ Cheng และคณะ (1993) เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วในช่วงเวลาหนึ่ง งานแต่ละงานจะดำเนินการบนเครื่องจักรเพียงเครื่องเดียว ในขณะที่ปัญหานี้การถ่ายทำฉากหนึ่งอาจมีนักแสดงต้องเข้าฉากหลายคนก็ได้ เช่นเดียวกับปัญหาของ Smith (2003) ซึ่งต้องพิจารณาการจัดตารางของนักดนตรีแต่ละคน และในการซ้อมเพลงเพลงหนึ่งอาจมีนักดนตรีที่ต้องเข้าร่วมหลายคนเช่นกัน

ปัญหาของงานวิจัยนี้ แตกต่างจากปัญหาของ Cheng และคณะ (1993) และปัญหาของ Smith (2003) ในแง่ที่มีการแบ่งการซ้อมออกเป็นหลายวัน และคำนึงถึงจำนวนวันที่นักดนตรีเข้าร่วมการซ้อมควบคู่ไปกับเวลาที่นักดนตรีรอโดยไม่ได้ทำการซ้อม จากข้อแตกต่างดังกล่าวปัญหาของงานวิจัยนี้จึงมีความคล้ายคลึงกับปัญหาการจัดตารางการผลิตสำหรับระบบเครื่องจักรขนาน เนื่องจากสิ่งสำคัญที่ส่งผลต่อคำตอบคือการจัดสรรเพลงให้กับการซ้อมแต่ละวันและการจัดเรียงลำดับเพลงในการซ้อมแต่ละวัน คล้ายกับการจัดสรรงานให้เครื่องจักรแต่ละเครื่องและการเรียงลำดับงานที่ทำบนเครื่องจักรนั้นๆ แต่ในขณะที่ปัญหาการจัดตารางสำหรับเครื่องจักรขนานให้ความสนใจกับเวลาในการปิดงานของระบบ หรือเวลาเสร็จของแต่ละงาน ปัญหาของงานวิจัยนี้ให้ความสนใจกับนักดนตรีแต่ละคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับเพลงจัดสรรให้การซ้อมแต่ละวัน โดยเปรียบเทียบนักดนตรีแต่ละคนเป็นทรัพยากรประเภทหนึ่ง ซึ่งเพลงแต่ละเพลงเปรียบเทียบเป็นงานนั้นมีความจำเป็นต้องใช้ทรัพยากรในการดำเนินงานไม่เหมือนกัน และการจัดสรรเพลงให้การซ้อมแต่ละวันเปรียบเทียบเป็นการจัดสรรงานให้เครื่องจักร โดยเป้าหมายของงานวิจัยคือลดจำนวนประเภทของทรัพยากรที่ใช้ในแต่ละเครื่องจักร และลดเวลาที่เครื่องจักรนำทรัพยากรแต่ละประเภทมาเก็บไว้เพื่อรอเรียกใช้ให้เหลือน้อยที่สุด หรือก็คือลดจำนวนวันที่นักดนตรีต้องเข้าร่วมการซ้อมและลดเวลารอโดยไม่ได้ซ้อมนั่นเอง

"ในระบบผลิตที่ประกอบไปด้วยเครื่องจักรขนาน (Parallel Machines) สามารถเลือกทำบนเครื่องจักรใดก็ได้จากจำนวนเครื่องจักรขนานที่มีอยู่ การนำเครื่องจักรขนานมาใช้งานในระบบผลิตจะทำให้ระบบผลิตมีกำลังการผลิตเพิ่มขึ้น" (ปารเมศ (2551)) ระบบผลิตที่ประกอบไปด้วยเครื่องจักรขนานนี้ สามารถแบ่งประเภทออกได้เป็น 3 ประเภทได้แก่ 1) เครื่องจักรขนานที่เหมือนกันทุกประการ (Identical Machines) ประกอบด้วยเครื่องจักร m เครื่องที่เหมือนกัน เครื่องจักรแต่ละเครื่องมีความสามารถในการทำงานใดๆ ได้ด้วยความเร็วเท่ากัน 2) เครื่องจักรขนานที่มีอัตราการผลิตต่างกัน (Uniform Machines) ประกอบด้วยเครื่องจักร m เครื่องที่มีอัตราผลิตแตกต่างกันเป็นอัตราส่วนที่คงที่ เช่น หากเครื่องจักรที่ 2 ทำงานได้ช้ากว่าเครื่องจักรที่ 1 แล้วอัตราส่วนของเวลาดำเนินงานของงานใดๆที่ทำบนเครื่องจักรที่ 2 เปรียบเทียบกับเวลาดำเนินของของงานนั้นบนเครื่องจักรที่ 1 จะมีค่าคงที่เสมอ 3) เครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน (Unrelated Machines) ประกอบด้วยเครื่องจักรที่มีความเร็วในการดำเนินงานแตกต่างกัน โดยไม่สัมพันธ์กัน เช่น เครื่องจักรที่ 1 อาจทำงาน A ได้เร็วกว่าเครื่องจักรที่ 2 แต่ทำงาน B ได้ช้ากว่าเครื่องจักรที่ 2 เป็นต้น

ระบบเครื่องจักรขนานได้รับความสนใจทำการศึกษามาเป็นเวลานาน ในมุมมองที่หลากหลาย รวมถึงผู้วิจัยจำนวนมากพยายามคิดค้นวิธีการจัดตารางสำหรับระบบเครื่องจักรขนานเพื่อให้สามารถจัดตารางได้ถูกต้องและรวดเร็ว Cheng (1989) เสนอฮิวริสติกส์เพื่อหาวันกำหนดส่งมอบงานร่วมกัน (Common Due Date) ของระบบเครื่องจักรขนานเหมือนกันทุกประการ และงานทุกงานมีเวลาพร้อมเริ่มงานพร้อมกัน เพื่อลดค่าปรับจากงานที่เสร็จไม่ตรงกำหนดทั้งก่อน (Earliness) และหลัง (Tardiness) วันกำหนดส่งมอบงานให้น้อยที่สุด โดยกำหนดให้ระบบผลิตไม่มีการแทรกงาน และ ไม่มีเวลาเดินเปล่าของเครื่องจักรแต่ละเครื่อง จากการทดสอบพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคำตอบที่ดีที่สุดจากแบบจำลองคณิตศาสตร์แล้ว ฮิวริสติกส์ที่คิดค้นขึ้นนั้นให้คำตอบแตกต่างจากคำตอบที่ดีที่สุดประมาณร้อยละ 5 เท่านั้น จากนั้น Cheng และ Chen (1994) ได้นำปัญหาของ Cheng (1989) นี้มาขยายขอบเขตโดยให้มีเวลาเดินเปล่าของเครื่องจักรได้ แต่ยังคงห้ามมีการแทรกงานดังเดิม โดยเสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับวัตถุประสงค์ 2 ข้อได้แก่ ลดค่าปรับโดยรวมจากงานที่เสร็จไม่ตรงกำหนด (Total Penalty) ลงให้น้อยที่สุด และลดค่าปรับของงานที่มากที่สุด (Maximal Penalty) ลงให้น้อยที่สุด นอกจากนี้ยังนำเสนออัลกอริทึมในการจัดตารางของปัญหารูปแบบพิเศษที่มีระยะเวลาดำเนินงานของทุกงานเท่ากันอีกด้วย

ปัญหาการจัดตารางของระบบเครื่องจักรขนานเพื่อ ลดค่าปรับโดยรวมจากงานที่เสร็จไม่ตรงกำหนด (Total Penalty) ลงให้น้อยที่สุด นี้ยังได้รับความสนใจในการหาคำตอบด้วยจีนเนติกอัลกอริทึมด้วยเช่นกัน โดย Cheng และคณะ(1995) ประยุกต์ใช้จีนเนติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดตารางของระบบเครื่องจักรขนานเหมือนกันทุกประการเพื่อลดค่าปรับถ่วงน้ำหนักจากการเสร็จไม่ตรงกำหนดของงานที่มากที่สุด (Maximum Weighted Absolute Lateness) ลงให้น้อยที่สุด โดยคิดค้นวิธีในการสร้างรูปแบบคำตอบ รวมถึงการดำเนินการของจีนเนติกอัลกอริทึมทั้งการครอสโอเวอร์ และมิวเทชัน ที่เหมาะสมกับปัญหาเครื่องจักรขนาน หลังจากนั้น Cheng และ Gen (1997) เสนอการประยุกต์ใช้เมเมติกอัลกอริทึม (Memetic Algorithm) ในการจัดตารางของระบบเครื่องจักรขนานเหมือนกันทุกประการเพื่อลดค่าปรับถ่วงน้ำหนักจากการเสร็จไม่ตรงกำหนดของงานที่มากที่สุด (Maximum Weighted Absolute Lateness) ลงให้น้อยที่สุดเช่นกัน ซึ่งเมเมติกอัลกอริทึมก็คือจีนเนติกอัลกอริทึมซึ่งเพิ่มเติมการหาคำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะที่ (Local Search) เพื่อช่วยให้สามารถหาคำตอบได้ดีขึ้นโดยยังยึดการสร้างรูปแบบคำตอบรวมถึงการดำเนินการของจีนเนติกอัลกอริทึมทั้งการครอสโอเวอร์ และมิวเทชัน เหมือนกับ Cheng และคณะ (1995) ดังเดิม จากนั้น Sivrikaya-Serifoglu และ Ulusoy (1999) เสนอการใช้จีนเนติกอัลกอริทึม

ในการหาคำตอบเพื่อลดค่าปรับถ่วงน้ำหนักจากการเสร็จงานก่อนหรือหลังวันกำหนดส่งมอบงาน (Sum of The Weighted Earliness and Tardiness) ในการจัดตารางของระบบเครื่องจักรขนาน ซึ่งแบ่งออกเป็นสองประเภทที่มีอัตราการผลิตต่างกัน งานแต่ละงานไม่มีข้อกำหนดลำดับก่อนหลังของงาน แต่มีเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรเปลี่ยนไปตามลำดับของงานและงานแต่ละงานมีเวลาพร้อมเริ่มงานแตกต่างกัน รวมทั้งห้ามไม่ให้มีการแทรกงาน หลังจากนั้น Jou (2005) เสนอวิธีการสร้างรูปแบบคำตอบ (encoding) ของจีนเนติกอัลกอริทึมสำหรับระบบเครื่องจักรขนาน ซึ่งปรับปรุงจากวิธีของ Cheng และ Gen (1997) และเสนอวิธีในการครอสโอเวอร์และมิวเทชันอีกรูปแบบหนึ่ง นอกจากนี้ยังได้เสนอวิธีการในการป้องกันการลู่เข้าของคำตอบก่อนกำหนด จากการวิจัยพบว่า วิธีการของ Jou (2005) ให้ผลที่ดีกว่า และมีการเบี่ยงเบนของคำตอบน้อยกว่าคำตอบที่ได้จากกฎการจัดตารางหรือ จีนเนติกอัลกอริทึมทั่วไป

หลังจาก Cheng(1989) เสนอฮิวริสติกสำหรับแก้ปัญหาเพื่อหาวันกำหนดส่งมอบงานร่วมกัน (Common Due Date) ของระบบเครื่องจักรขนานเหมือนกันทุกประการ และงานทุกงานมีเวลาพร้อมเริ่มงานพร้อมกัน เพื่อลดค่าปรับจากงานที่เสร็จไม่ตรงกำหนดทั้งก่อน (Earliness) และหลัง (Tardiness) วันกำหนดส่งมอบงานให้น้อยที่สุด Min และ Cheng (2006) เสนอวิธีการสำหรับสร้างรูปแบบคำตอบของ จีนเนติกอัลกอริทึมสำหรับระบบเครื่องจักรขนานเหมือนกันทุกประการเพื่อหาวันกำหนดส่งมอบงานร่วมกัน (Common Due Date) ของระบบเครื่องจักรขนานเหมือนกันทุกประการ และงานทุกงานมีเวลาพร้อมเริ่มงานพร้อมกัน เพื่อลดค่าปรับจากงานที่เสร็จไม่ตรงกำหนดทั้งก่อน (Earliness) และหลัง (Tardiness) วันกำหนดส่งมอบงานให้น้อยที่สุด โดยแบ่งโครโมโซมออกเป็นสามส่วนเพื่อแทนข้อมูลลำดับการดำเนินงาน, จำนวนงานในเครื่องจักร และวันกำหนดส่งมอบ จากนั้นผสมจีนเนติกอัลกอริทึมเข้ากับฮิวริสติก Simulated Annealing และ ฮิวริสติก ที่ Min และ Cheng (2006) คิดค้นขึ้นและนำเสนอให้เป็น Local Search สำหรับจีนเนติกอัลกอริทึม ในปัญหานี้ ซึ่งจากการทดสอบพบว่า จีนเนติกอัลกอริทึมที่ผสมกับทั้ง Simulated Annealing และ ฮิวริสติก ดังกล่าวให้คำตอบได้ดีที่สุด ซึ่งก่อนหน้านั้น Min และ Cheng (1999) เสนอการใช้จีนเนติกอัลกอริทึมเพื่อลดเวลาปิดงานของระบบ (Makespan) ให้น้อยที่สุดสำหรับปัญหาการจัดตารางเครื่องจักรขนานเหมือนกันทุกประการ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ จีนเนติกอัลกอริทึมกับกฎการจ่ายงาน LPT (Largest Processing Time) และวิธีการหาคำตอบด้วยฮิวริสติกที่มีพื้นฐานจาก Simulated Annealing พบว่า จีนเนติกอัลกอริทึมให้คำตอบที่ดีกว่าทั้งสองวิธีแม้ในปัญหาขนาดใหญ่ ทั้งในด้านของคำตอบที่ดีที่สุดที่หาได้ และคำตอบโดยเฉลี่ย

ในการจัดตารางสำหรับระบบเครื่องจักรขนานด้วยวัตถุประสงค์อื่นนอกจากลดค่าปรับ โดยรวมจากงานที่เสร็จไม่ตรงกำหนดนั้น Chang และคณะ (2005) เสนอวิธีการจัดตารางสำหรับระบบเครื่องจักรขนานเหมือนกันทุกประการ โดยแบ่ง จีนเนติกอัลกอริทึม ออกเป็นสองส่วน ในส่วนแรกแบ่งประชากรของคำตอบออกเป็นกลุ่มย่อย หลายๆกลุ่ม และให้แต่ละกลุ่มหาคำตอบโดยที่สมการวัตถุประสงค์ประกอบด้วยวัตถุประสงค์ 2 ชนิด และแต่ละชนิดมีการถ่วงน้ำหนักไม่เท่ากันสำหรับประชากรแต่ละกลุ่ม เพื่อให้มีการหาคำตอบที่กระจายตัว และในส่วนที่สองของการหาคำตอบจะนำคำตอบในกลุ่มย่อยทั้งหมดมารวมกัน แล้วกำหนดให้แต่ละโครโมโซมหาคำตอบที่มีการถ่วงน้ำหนักแตกต่างกันไปอีกครั้ง เพื่อให้มีการกระจายตัวของการหาคำตอบ จากนั้นนำคำตอบที่ได้มาประเมินด้วย ฟังก์ชันกำหนดค่าความเหมาะสมแล้วทำการคัดเลือกประชากรสำหรับรุ่นต่อไปจากนั้น Tavakkoli-Moghaddam และคณะ (2009) เสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์และ จีนเนติกอัลกอริทึมเพื่อใช้สำหรับการจัดตารางระบบเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน งานแต่ละงานมีข้อกำหนดลำดับก่อนหลังของงาน แต่มีเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรเปลี่ยนไปตามลำดับก่อนหลังของงาน โดยมีวัตถุประสงค์สองข้อ ได้แก่ ลดจำนวนของงานสาย (Number of Tardy jobs) ให้น้อยที่สุด และ ลดเวลาเสร็จงานของทุกงาน (Total Completion of All jobs)

2.3 **ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตแบบเซลลูลาร์** (Cellular manufacturing)

ในส่วนแรกของปัญหาการจัดตารางซ้อมดนตรีซึ่งแบ่งการซ้อมออกเป็นหลายวันนั้น การแบ่งเพลงเพื่อทำการซ้อมในแต่ละวันนั้นมีลักษณะคล้ายกับการออกแบบการผลิตแบบเซลลูลาร์ คือ *"วิธีการหนึ่งของการผลิตแบบลีน (Lean Manufacturing) วิธีหนึ่งที่ช่วยให้บริษัทสามารถผลิตผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิดสำหรับลูกค้าได้โดยมีความสูญเปล่าเกิดขึ้นน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ในการผลิตแบบเซลลูลาร์ อุปกรณ์ และสถานีงาน (Workstation) จะถูกจัดเรียงไว้ตามลำดับซึ่งจะช่วยให้วัสดุและส่วนประกอบต่างๆสามารถไหลผ่านตลอดทั้งกระบวนการไปได้อย่างราบรื่น โดยมีการขนส่งหรือความล่าช้าเกิดขึ้นน้อยที่สุด"* (วิทยา, 2549) การผลิตแบบเซลลูลาร์ (Cellular Manufacturing) เป็นผลิตที่เกิดจากแนวคิด Group Technology โดยแบ่งการผลิตออกเป็นเซลล์ย่อยๆซึ่งแต่ละเซลล์ประกอบไปด้วย กลุ่มของเครื่องจักรและกลุ่มของชิ้นส่วนที่เครื่องจักรเหล่านั้นทำการผลิต โดยการแบ่งการผลิตออกเป็นเซลล์นี้ช่วยให้ผู้ผลิตสามารถลดเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักร (Setup time), ลด In-process Inventories, เพิ่มคุณภาพผลผลิต, ลดเวลานำลง และปรับปรุง productivity เป็นต้น แต่ทั้งนี้การแบ่งการผลิตออกเป็นเซลล์นี้มีข้อเสียคือมีการใช้

อรรถประโยชน์ (Utilization) ของเครื่องจักรและแรงงานต่ำ รวมทั้งมีการลงทุนสูงจากการเพิ่มเครื่องจักรและเครื่องมือบางชนิด (Singh (1993))

McCormick และคณะ (1972) เสนอ Bond Energy Algorithm (BEA) สำหรับการออกแบบการผลิตแบบเซลลูลาร์ โดยมีแนวคิดในการประเมินคำตอบด้วย ผลรวมของผลคูณของสมาชิกที่อยู่ติดกันในแมททริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องจักรและชิ้นส่วน โดยค่า 1 ในแมททริกซ์แสดงว่าเครื่องจักรมีการผลิตชิ้นส่วนนั้นๆ และค่า 0 แสดงว่าเครื่องจักรไม่มีการผลิตชิ้นส่วนนั้นๆ เรียกผลรวมนี้ว่า Measure of Effectiveness (ME) ดังภาพที่ 2.1 ยิ่งผลรวมมีค่ามากคำตอบนั้นยิ่งมีการจัดการผลิตเป็นเซลล์ที่เป็นอิสระต่อกันมาก ทั้งนี้ McCormick และคณะ (1972) ใช้แนวคิดในการจัดเรียงแถวและคอลัมภ์สำหรับคำตอบคล้ายกับปัญหา Travelling Salesperson คือ สุ่มเลือกคอลัมภ์ตั้งต้นมาก่อน 1 คอลัมภ์เพื่อเป็นจุดเริ่มต้น แล้วหาคอลัมภ์ที่นำมาเรียงต่อจากคอลัมภ์ตั้งต้นที่ให้ผล ME สูงสุด แล้วทำเช่นนี้ต่อไปจนเรียงครบทุกคอลัมภ์ จากนั้น Boe และ Cheng (1991) เสนอวิธี Close Neighbour Algorithm สำหรับออกแบบการ

machine \ part	1	2	3	4
a	1	0	1	0
b	0	1	0	1
c	1	0	1	0
d	0	1	0	1

รูปที่ 2.1 ก
ME = 0

machine \ part	1	2	3	4
a	1	0	1	0
b	0	1	0	1
c	0	1	0	1
d	1	0	1	0

รูปที่ 2.1 ข
ME = 2

machine \ part	1	2	3	4
a	1	0	1	0
b	1	0	1	0
c	0	1	0	1
d	0	1	0	1

รูปที่ 2.1 ค
ME = 4

machine \ part	1	2	3	4
a	1	1	0	0
b	0	0	1	1
c	0	0	1	1
d	1	1	0	0

รูปที่ 2.1 ง
ME = 6

machine \ part	1	2	3	4
a	1	1	0	0
b	1	1	0	0
c	0	0	1	1
d	0	0	1	1

รูปที่ 2.1 จ
ME = 8

ภาพที่ 2.1 ค่า ME ของรูปแบบการจัดการผลิตแบบต่างๆ (McCormick และคณะ (1972))

ผลิตแบบเซลลูลาร์ซึ่งปรับปรุงจากวิธี BEA ของ McCormick และคณะ (1972) โดยมีแนวคิดในการจัดลำดับเครื่องจักรโดยคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องจักรจากจำนวนชิ้นส่วนที่ทำการผลิตเหมือนกัน ยิ่งเครื่องจักรมีจำนวนชิ้นส่วนที่ผลิตเหมือนกันมากก็ยิ่งมีความใกล้ชิดกันมาก และจัดให้เครื่องจักรที่มีความสัมพันธ์กับเครื่องจักรอื่นๆมาก มีความสำคัญมากด้วยเช่นกัน

สำหรับระบบการผลิตที่มีขนาดใหญ่มากๆนั้น Moon และ Gen (1999) เห็นว่าแบบจำลองสำหรับการออกแบบการผลิตแบบเซลลูลาร์ที่มีการนำเสนอกันมา นั้นยังมีข้อจำกัดในด้านจำนวนเครื่องจักรและชิ้นส่วนที่ทำการผลิต เมื่อจำนวนเครื่องจักรและชิ้นส่วนเพิ่มมากขึ้นแล้ว แบบจำลองเหล่านั้นอาจมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอในการออกแบบระบบการผลิตซึ่งเซลลูลาร์แยกกันเป็นอิสระ Moon และ Gen (1999) จึงเสนอการประยุกต์ใช้ฮิวริสติก โดยมีพื้นฐานจาก จีนเนติกอัลกอริทึม เพื่อลดต้นทุนในการออกแบบระบบการผลิตแบบเซลลูลาร์ให้ต่ำที่สุด สำหรับการผลิตที่ชิ้นส่วนที่ผลิตมีแผนการผลิตตั้งแต่สองแผนการผลิตขึ้นไป และมีข้อจำกัดในด้านกำลังการผลิตของเครื่องจักร และ จำนวนเซลล์สูงสุดที่มีได้ รูปแบบการเข้ารหัสโครโมโซมของ Moon และ Gen (1999) นั้นมีลักษณะดังนี้

สมมติว่าระบบทำการผลิตชิ้นส่วนทั้งหมด 5 ประเภท โดยที่แต่ละชิ้นส่วนมี process plan ดังนี้ ชิ้นส่วนที่ 1 = 2, ชิ้นส่วนที่ 2 = 3, ชิ้นส่วนที่ 3 = 2, ชิ้นส่วนที่ 4 = 1 และ ชิ้นส่วนที่ 5 = 2 และมีจำนวนเซลล์สูงสุดที่อนุญาตให้มีได้เท่ากับ 4 อาจสร้างโครโมโซมโดยการสุ่มได้ดังนี้

$$S_i = [5\ 2\ 7\ 1\ 6]$$

จากนั้นทำการคำนวณหา process plan และ เซลล์ของแต่ละชิ้นส่วนได้ดังนี้

ให้ j แทน process plan ที่ชิ้นส่วนนั้นเลือกทำการผลิต และ c แทนลำดับเซลล์ที่ทำการผลิตชิ้นส่วนนั้นๆ โดย j และ c หาได้ดังนี้

ให้ d เป็นค่าซึ่งสุ่มขึ้นมาสำหรับแต่ละชิ้นส่วนในโครโมโซม และ cn เท่ากับจำนวนเซลล์สูงสุดที่อนุญาตให้มีได้ จะหาค่า j และ c ได้ดังนี้

$$j = (d-1) \backslash cn + 1$$

และ

$$c = (d-1) mod\ cn + 1$$

จากสมการดังกล่าวจะหาค่า process plan และ เซลล์ที่ทำการผลิตชิ้นส่วนต่างๆได้ดังนี้

$$SS_i = [(2,1)(1,2)(2,3)(1,1)(2,2)]$$

จากนั้น Mak และคณะ (2000) เสนอจีนเนติกอัลกอริทึมสำหรับออกแบบการผลิตแบบเซลลูลาร์อีกรูปแบบหนึ่งและกำหนดให้มีการปรับเปลี่ยนอัตราการเกิดครอสโอเวอร์และมิวเทชันตามคำตอบที่ได้ในแต่ละเจเนอเรชันเปรียบเทียบกับคำตอบจากเจเนอเรชันก่อนหน้า หากคำตอบ

ดีกว่าเจเนอเรชันก่อนหน้าอัตราการเกิดครอสโอเวอร์และมิวเทชันจะเพิ่มขึ้น และอัตราส่วนดังกล่าวจะลดลงหากคำตอบที่ได้แย่กว่าคำตอบจากเจเนอเรชันก่อนหน้า ทั้งนี้ Mak และคณะ (2000) ประเมินคำตอบที่ได้ด้วยฟังก์ชันความเหมาะสมที่มีแนวคิดจากวิธี BEA ของ McCormick และคณะ (1972) โดยลักษณะการเข้ารหัสของ Mak และคณะ (2000) จะแบ่งโครโมโซมออกเป็นสองส่วน โดยส่วนแรกมีจำนวนสมาชิกเท่ากับจำนวนเครื่องจักรในระบบ และส่วนหลังมีจำนวนสมาชิกเท่ากับจำนวนชิ้นส่วนที่ทำการผลิต หากระบบมีเครื่องจักร 6 เครื่อง และมีจำนวนชิ้นส่วนที่ทำการผลิตเท่ากับ 7 ชิ้น จะสามารถสุ่มเลือกสมาชิกโครโมโซมได้ดังนี้

$$\theta = (1\,3\,4\,6\,2\,5 \;\; 2\,3\,4\,6\,1\,5\,7)$$

โดยสมาชิก 6 ตัวในส่วนแรกของโครโมโซม ได้แก่ $1\,3\,4\,6\,2\,5$ แสดงลำดับการจัดเรียงเครื่องจักร และสมาชิก 7 ตัวในส่วนท้ายของโครโมโซม ได้แก่ $2\,3\,4\,6\,1\,5\,7$ แสดงลำดับการจัดเรียงชิ้นส่วนในการผลิต จากนั้นจึงทำการประเมินการจัดเรียงดังกล่าวด้วยวิธี BEA ต่อไป

จากนั้น Wu และคณะ (2007) เสนอวิธีการเข้ารหัสของโครโมโซมสำหรับจีนเนติกอัลกอริทึมเพื่อออกแบบการผลิตแบบเซลลูลาร์ซึ่งต่างไปจาก Moon และ Gen (1999) และ Mak และคณะ (2000) รวมถึงใช้การประเมินค่าของคำตอบด้วยฟังก์ชันความเหมาะสมซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปตามคำตอบในแต่ละเจเนอเรชัน ทั้งนี้รูปแบบการเข้ารหัสของโครโมโซมของคล้ายกับ Wu และคณะ (2007) นี้ Tariq และคณะ (2009) ได้นำมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบการผลิตแบบเซลลูลาร์เช่นกัน แต่ลดรูปลง จากเดิมรูปแบบโครโมโซมของ Wu และคณะ (2000) นั้นมีทั้งจีนที่ระบุเซลล์สำหรับเครื่องจักรและชิ้นส่วนที่ผลิต รวมถึงลำดับของเครื่องจักรแต่ละเครื่อง แต่อัลกอริทึมของ Tariq และคณะ (2009) นี้โครโมโซมมีเพียงจีนที่ระบุเซลล์สำหรับเครื่องจักรและชิ้นส่วนที่ผลิตเท่านั้น ลักษณะการเข้ารหัสโครโมโซมของ Wu และคณะ (2007) และ Tariq และคณะ (2009) มีลักษณะดังนี้

โครโมโซมของ Wu และคณะ (2007) จะแบ่งออกเป็น 2 เลเยอร์ โดยเลเยอร์ที่ 1 จะแบ่งเป็น 2 ส่วนประกอบด้วยส่วนแรกคือสมาชิกจำนวนเท่าจำนวนเครื่องจักรในระบบ และส่วนท้ายมีจำนวนสมาชิกเท่าจำนวนชิ้นส่วนที่ผลิตเช่นเดียวกับโครโมโซมของ Mak และคณะ (2000) แต่สำหรับโครโมโซมของ Wu และคณะ (2007) ค่าของสมาชิกแต่ละตัวในโครโมโซมในเลเยอร์ที่ 1 จะบ่งบอกว่าสมาชิกตัวนั้นเกี่ยวข้องกับเซลล์การผลิตใด และค่าของสมาชิกใน เลเยอร์ที่ 2 จะบอกลำดับการจัดเรียงของเครื่องจักร ดังภาพที่ 2.2

	Machine							Part									
Layer 1	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	2	1	2	2	2	2
Layer 2	3	4	2	5	1	6	7										

ภาพที่ 2.2 ลักษณะการเข้ารหัสโครโมโซมของ Wu และคณะ (2007)

ส่วนโครโมโซมของ Tariq และคณะ (2009) นั้นมีลักษณะเหมือนกับโครโมโซมเลเยอร์ที่ 1 ของ Wu และคณะ (2007) แต่นอกเหนือไปจากการดำเนินการหลักของจีนเนติกอัลกอริทึมที่ใช้โดยทั่วไปอย่างการครอสโอเวอร์และมิวเทชันแล้ว Tariq และคณะ (2009) ยังประยุกต์ใช้การอินเวอร์ชัน (Inversion) ซึ่งคือการกลับด้านโครโมโซมที่เลือกขึ้นมา และใช้วิธีการในการซ่อมแซม (Repair Strategy) สำหรับโครโมโซมที่เป็นคำตอบที่เป็นไปไม่ได้อีกด้วย จากนั้นหลังจากได้คำตอบในแต่ละเจเนอเรชันแล้ว คำตอบที่ดีที่สุดจะถูกนำมาหาคำตอบเพิ่มเติมด้วย local search อีกครั้ง

งานวิจัยต่างๆทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางซ้อมดนตรี งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการผลิตของระบบเครื่องจักรขนาน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตแบบเซลลูลาร์ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1, 2.2 และ 2.3

ตารางที่ 2.1 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางซ้อมดนตรี

ผู้แต่ง	ปี	ประเภทการจัดตาราง	วัตถุประสงค์	ระเบียบวิธีการ	ข้อแตกต่างจากงานวิจัยอื่น
Cheng และคณะ	1993	การถ่ายทำภาพยนต์	ลดต้นทุนจากการที่นักแสดงอยู่ในกองถ่ายแต่ไม่ได้เข้าฉาก	ฮิวริสติกส์	แก้ปัญหาด้วยฮิวริสติกส์
Smith	2003	การซ้อมของวงออร์เคสต้รา	ลดเวลารอของนักดนตรี	แบบจำลองคณิตศาสตร์	แก้ปัญหาด้วย constraint programming
Gregory และคณะ	2004	การซ้อมของวงออร์เคสต้รา	ลดเวลารอของนักดนตรี	แบบจำลองคณิตศาสตร์	ประยุกต์วิธีการ planning และ model checking ในการแก้ปัญหา
Gracia de la Banda และคณะ	2010	การถ่ายทำภาพยนต์	ลดต้นทุนจากการที่นักแสดงอยู่ในกองถ่ายแต่ไม่ได้เข้าฉาก	dynamic programming	การประยุกต์การแก้ปัญหาด้วย dynamic programming

ตารางที่ 2.2 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการผลิตของระบบเครื่องจักรขนาน

ผู้แต่ง	ปี	ประเภทการจัดตาราง	วัตถุประสงค์	ระเบียบวิธีการ	ข้อแตกต่างจากงานวิจัยอื่น
Cheng	1989	Identical Parallel Machine	Minimize Earliness and Tardiness	ฮิวริสติกส์	เครื่องจักรไม่มีเวลาเดินเปล่า
Cheng และ Chen	1994	Identical Parallel Machine	Minimize Total Penalty และ Minimize Maximum Penalty	ฮิวริสติกส์	อนุญาตเครื่องจักรมีเวลาเดินเปล่า
Cheng และคณะ	1995	Identical Parallel Machine	Minimize Maximum Weighted Absolute Lateness	Genetic Algorithm	วัตถุประสงค์, วิธีการ
Cheng และ Gen	1995	Identical Parallel Machine	Minimize Maximum Weighted Absolute Lateness	Memetic Algorithm	วัตถุประสงค์, วิธีการ
Sivrikaya-Serifoglu และ Ulusoy	1999	Uniform Parallal Machine	Minimize Sum of The Weighted Earliness and Tardiness	Genetic Algorithm	ลักษณะเครื่องจักร

ผู้แต่ง	ปี	ประเภทการจัดตาราง	วัตถุประสงค์	ระเบียบวิธีการ	ข้อแตกต่างจากงานวิจัยอื่น
Jou	2005	Identical Parallel Machine	Minimize Maximum Weighted Absolute Lateness	Genetic Algorithm	วิธีการครอสโอเวอร์และมิวเทชันสำหรับจีเนติกอัลกอริทึม
Min และ Cheng	1999	Identical Parallel Machine	Minimize Makespan	Genetic Algorithm	วัตถุประสงค์
Min และ Cheng	2006	Identical Parallel Machine	Minimize Earliness and Tardiness	Hybrid Genetic Algorithm	วัตถุประสงค์, วิธีการ
Chang และคณะ	2005	Identical Parallel Machine	Minimize Makespan และ Minimize Total Tardiness Time	Genetic Algorithm	วัตถุประสงค์, วิธีการ
Tavakkoli-Moghaddam และคณะ	2009	Unrelated Parallel Machine	Minimize Number of Tardy jobs และ Minimize Total Completetion of All Jobs	แบบจำลองคณิตศาสตร์และ Genetic Algorithm	ลักษณะเครื่องจักร, เวลาปรับตั้งเครื่องจักร

ตารางที่ 2.3 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตแบบเซลลูลาร์

ผู้แต่ง	ปี	ประเภทการจัดตาราง	ระเบียบวิธีการ	ข้อแตกต่างจากงานวิจัยอื่น
McCormick และคณะ	1972	Cellular Manufacturing	Bond Energy Algorithm	คำนึงถึงความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องจักรและชิ้นส่วนที่อยู่ติดกัน
Boe และ Cheng	1991	Cellular Manufacturing	Closeness Neighbour Algorithm	คำนึงถึงความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องจักรสำหรับทุกชิ้นส่วน
Moon และ Gen	1999	Cellular Manufacturing	Genetic Algorithm	จำกัดจำนวนเซลล์สูงสุดที่มีได้
Mak และ คณะ	2000	Cellular Manufacturing	Genetic Algorithm	อัตราการเกิดครอสโอเวอร์และมิวเทชันเปลี่ยนแปลงไปแต่ละเจเนอเรชัน
Wu และ คณะ	2007	Cellular Manufacturing	Genetic Algorithm	วิธีการเข้ารหัส และ ฟังก์ชันความเหมาะสมเปลี่ยนแปลงไปแต่ละเจเนอเรชัน
Tariq และ คณะ	2009	Cellular Manufacturing	Genetic Algorithm	ประยุกต์ใช้ inversion และ Repair Strategy

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัยกรณีที่ทุกเพลงมีความยาวเท่ากัน

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดและขั้นตอนในการวิจัย แนวคิดในการพัฒนาวิธีการจัดตารางการซ้อมดนตรี รวมถึงผลการวิจัยในกรณีที่เพลงทุกเพลงมีความยาวเท่ากัน ทั้งนี้งานวิจัยนี้แบ่งปัญหาออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการจัดสรรเพลงสำหรับการซ้อมในแต่ละวันเพื่อให้มีจำนวนวันโดยรวมที่นักดนตรีแต่ละคนต้องมาสถานที่ซ้อมน้อยที่สุดโดยใช้วิธีการฮิวริสติกส์ที่พัฒนาขึ้นโดยมีพื้นฐานจากการออกแบบการผลิตแบบเซลล์ จากนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นจะนำมาใช้ในส่วนที่สองเพื่อหาการจัดลำดับเพลงเพื่อให้เวลาทั้งหมดที่นักดนตรีอยู่ในสถานที่ซ้อมโดยที่ไม่ได้ทำการซ้อมมีค่าน้อยที่สุด

3.1 ลักษณะของปัญหาที่ทำการศึกษา

ปัญหาการจัดตารางการซ้อมดนตรีซึ่งทำการศึกษานั้น แบ่งการซ้อมออกเป็นหลายวัน แต่ละวันมีเวลาในการซ้อมเท่ากันและความยาวโดยรวมของเพลงที่ทำการซ้อมในวันนั้นๆจะต้องไม่เกินเวลาดังกล่าว เพลงที่ทำการซ้อมแต่ละเพลงมีความยาวในการซ้อมเท่ากัน และมีนักดนตรีที่ต้องเข้าร่วมการซ้อมแต่ละเพลงแตกต่างกันไป ทั้งนี้นักดนตรีจะต้องมาสถานที่ซ้อมเฉพาะวันที่มีเพลงที่ตนมีส่วนร่วมทำการซ้อมเท่านั้น นอกจากนี้นักดนตรีจะต้องมาถึงสถานที่ซ้อมก่อนที่เพลงแรกที่ตนมีส่วนร่วมในวันนั้นเริ่มทำการซ้อม และจะออกจากสถานที่ซ้อมได้ต่อเมื่อการซ้อมของเพลงสุดท้ายที่ตนมีส่วนร่วมสิ้นสุดลง การจัดสรรเพลงสำหรับการซ้อมในแต่ละวัน และการจัดลำดับเพลงที่ทำการซ้อมในวันนั้นๆ มีวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนวันโดยรวมซึ่งนักดนตรีต้องอยู่ในสถานที่ซ้อม และลดเวลาซึ่งนักดนตรีที่อยู่ในสถานที่ซ้อมต้องรอในขณะที่วงดนตรีทำการซ้อมเพลงที่ตนไม่มีส่วนร่วม

3.1.1 ปัญหาของวงดนตรีกรณีศึกษา

วงดนตรีวงหนึ่งมีสมาชิก p คน ในการแสดงคอนเสิร์ตครั้งหนึ่งมีเพลงที่ใช้ในการบรรเลง m เพลง โดยมีจำนวนวันที่ทำการซ้อมได้ทั้งหมด q วัน แต่ละวันมีแบ่งเวลาในการซ้อมออกเป็น

ช่วงเวลา (slot) จำนวน n หน่วยโดยการซ้อมแต่ละเพลงมีความยาวในการซ้อมเท่ากัน และมีนักดนตรีที่ต้องเข้าร่วมการซ้อมแตกต่างกัน ดังตัวอย่างแสดงตารางความสัมพันธ์ระหว่างเพลงและนักดนตรีในตารางที่ 3.1 และในการซ้อมแต่ละครั้งนักดนตรีจะต้องมาถึงสถานที่ซ้อมก่อนการซ้อมในเพลงที่ตนต้องเล่นจะเริ่มและกลับจากสถานที่ซ้อมหลังจากเพลงสุดท้ายที่ตนต้องเล่นซ้อมเสร็จ ทั้งนี้เพลงใดที่จำเป็นต้องซ้อมหลายครั้ง จะแยกออกเป็นหลายเพลงในตารางรายละเอียดเพลงดังกล่าว เช่น หากมีเพลง 5 เพลงที่ต้องซ้อม โดยแต่ละเพลงต้องซ้อม 3 วัน ดังนั้นตารางความสัมพันธ์ระหว่างเพลงและนักดนตรีก็จะมีรายชื่อเพลงทั้งหมด 15 เพลง เป็นต้น ทั้งนี้แบบจำลองคณิตศาสตร์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกทำการหาจำนวนวันโดยรวมที่นักดนตรีเข้าร่วมการซ้อม แล้วนำคำตอบที่ได้มาหาเวลาทั้งหมดที่นักดนตรีอยู่ในสถานที่ซ้อมโดยที่ไม่ได้ทำการซ้อมในส่วนที่ 2

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างตารางความสัมพันธ์ระหว่างเพลงและนักดนตรี

piece	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
player 1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1
player 2	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1
player 3	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
player 4	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1
player 5	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
player 6	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
player 7	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1
player 8	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0
player 9	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
player 10	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ค่าดัชนี (Index)

i = 1, . . ., n n = จำนวนช่วงเวลา (slot) ที่ทำการซ้อม

j = 1, . . ., m m = จำนวนเพลงที่ต้องทำการซ้อม

k = 1, . . .,p p = จำนวนนักดนตรีทั้งหมด

d = 1, . . ., q q = จำนวนวันที่ทำการซ้อม

ค่าพารามิเตอร์ (Parameter)

play_{kj} = 1 ถ้านักดนตรี k ต้องเล่นเพลงที่ j

= 0 ถ้านักดนตรี k ไม่ต้องเล่นเพลงที่ j

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable)

a_{dki} = 1 ถ้านักดนตรี k มาถึงในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

= 0 ถ้านักดนตรี k ยังมาไม่ถึงสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

l_{dki} = 1 ถ้านักดนตรี k ยังไม่ออกจากสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

= 0 ถ้านักดนตรี k ออกจากสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

r_{dki} = 1 ถ้านักดนตรี k อยู่ในสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

= 0 ถ้านักดนตรี k ไม่อยู่ในสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

w_{dki} = 1 ถ้านักดนตรี k อยู่ในสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d โดยไม่เข้าร่วมการซ้อม

= 0 ถ้านักดนตรี k อยู่ในสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d และเข้าร่วมการซ้อม

$\text{replay}_{\text{dki}}$ = 1 ถ้านักดนตรี k ต้องซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

= 0 ถ้านักดนตรี k ไม่ต้องซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

$\text{timetable}_{\text{dij}}$ = 1 ถ้าเพลงที่ j ทำการซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

= 0 ถ้าเพลงที่ j ไม่มีซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

stay_{dk} = 1 ถ้านักดนตรี k เข้าร่วมการซ้อมในวันที่ d

= 0 ถ้านักดนตรี k ไม่เข้าร่วมการซ้อมในวันที่ d

$z1$ = จำนวนวันโดยรวมที่นักดนตรีเข้าร่วมการซ้อม ซึ่งหาได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ส่วนที่ 1

$z2$ = เวลาทั้งหมดที่นักดนตรีอยู่ในสถานที่ซ้อมโดยที่ไม่ได้ทำการซ้อม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ส่วนที่ 1

สมการ (1) สมการวัตถุประสงค์สำหรับการหาคำตอบในส่วนที่ 1 สำหรับหาจำนวนวันที่นักดนตรีเข้าร่วมซ้อมทั้งหมด

สมการวัตถุประสงค์ (Objective Function)

Minimize $z1 = \sum_{d=1}^{q} \sum_{k=1}^{p} stay_{dk}$ .....(1)

ฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraint Function)

ข้อจำกัด (2) และ (3) แสดงการซ้อมจะต้องทำการซ้อมครบทุกเพลงโดยที่แต่ละเพลงต้องไม่มีการซ้อมซ้อนทับกัน

$\sum_{d=1}^{q} \sum_{i=1}^{n} timetable_{dij} = 1 \qquad \forall j \; in \; \{1, \dots, m\}$ .....(2)

$\sum_{j=1}^{m} timetable_{dij} \leq 1 \qquad \forall d \; in \; \{1, \dots, q\}, i \; in \; \{1, \dots, n\}$ .....(3)

ข้อจำกัด (4)) แสดงการแจกแจงข้อกำหนดในการซ้อมในแต่ละช่วงเวลา (slot) สำหรับนักดนตรีแต่ละคน

$$replay_{dki} = \sum_{j=1}^{m} timetable_{dij} \times play_{kj}$$

$$\forall d\ in\ \{1, \dots, q\}, k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\}$$

.....(4)

ข้อจำกัด (5) แสดงการเข้าร่วมซ้อมของนักดนตรีแต่ละคน ในแต่ละครั้งที่ซ้อม

$$\sum_{i=1}^{n} replay_{dki} \leq\ stay_{dk} \times M \qquad \forall d\ in\ \{1, \dots, q\}, k\ in\ \{1, \dots, p\}$$

.....(5)

ข้อจำกัด (6) ถึง (8) แสดงขอบเขตของตัวแปรในแบบจำลองส่วนที่ 1 ซึ่งเป็นตัวแปรฐานสอง (binary variables)

$$replay_{dki} = \{0, 1\} \qquad \forall d\ in\ \{1, \dots, q\}, k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\}$$

.....(6)

$$timetable_{dij} = \{0, 1\} \qquad \forall d\ in\ \{1, \dots, q\}, i\ in\ \{1, \dots, n\},\ j\ in\ \{1, \dots, m\}$$

.....(7)

$$stay_{dk} = \{0, 1\} \qquad \forall d\ in\ \{1, \dots, q\}, k\ in\ \{1, \dots p\}$$

.....(8)

ข้อจำกัด (9) แสดงขอบเขตตัวแปรในแบบจำลองส่วนที่ 1 มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

$$z1\ \geq 0$$

.....(9)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนที่ 2

หลังจากหาคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนที่ 1 มาแล้วจะนำจำนวนวันที่น้อยที่สุดจากสมการวัตถุประสงค์ (1) มาเป็นข้อจำกัดในแบบจำลองส่วนที่ 2 ดังข้อจำกัดที่ (17) เพื่อหาคำตอบในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ส่วนที่ 2 ต่อไป โดยเปลี่ยนสมการวัตถุประสงค์เป็นการหาเวลาทั้งหมดที่นักดนตรีอยู่ในสถานที่ซ้อมโดยที่ไม่ได้ทำการซ้อม

สมการ (10) สมการวัตถุประสงค์สำหรับการหาคำตอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนที่ 2 สำหรับหาเวลาทั้งหมดที่นักดนตรีอยู่ในสถานที่ซ้อมโดยที่ไม่ได้ทำการซ้อม

Minimize $z2 = \sum_{d=1}^{q} \sum_{k=1}^{p} \sum_{i=1}^{n} w_{dki}$ .....(10)

ในส่วนของฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraint Function) นั้นแบบจำลองคณิตศาสตร์ส่วนที่ 2 ยังคงมีฟังก์ชันข้อจำกัดที่ปรากฏในแบบจำลองส่วนที่ 1 ทุกฟังก์ชัน และเพิ่มเติมข้อจำกัดสำหรับจำนวนวันโดยรวมที่นักดนตรีเข้าร่วมการซ้อมซึ่งได้จากการหาคำตอบด้วยแบบจำลองส่วนที่ 1 ด้วย

ข้อจำกัด (11) ถึง (13) แสดงสถานะนักดนตรีอยู่ในสถานที่ซ้อมหลังจากมาถึงแล้วและยังไม่กลับ

$r_{dki} \geq a_{dki} + l_{dki} - 1 \quad \forall d\ in\ \{1, \dots, q\}, k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\}$ .....(11)

$a_{dki} \leq a_{dk(i+1)} \quad \forall d\ in\ \{1, \dots, q\}, k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n-1\}$ .....(12)

$l_{dki} \geq l_{dk(i+1)} \quad \forall d\ in\ \{1, \dots, q\}, k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n-1\}$ .....(13)

เช่น หากนักดนตรีคนหนึ่งมาถึงสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ 3 และ ออกจากสถานที่ซ้อมในช่วงเวลาที่ 8 ค่าของ a_{dki} , l_{dki} และ r_{dki} จะมีค่าดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างสำหรับตัวแปร a_{dki} , l_{dki} และ r_{dki}

slot	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a	0	0	1	1	1	1	1	1	1
l	1	1	1	1	1	1	1	0	0
r	0	0	1	1	1	1	1	0	0

ข้อจำกัด (14) และ (15) แสดงข้อกำหนดให้นักดนตรีต้องอยู่ในสถานที่ซ้อม ขณะที่มีซ้อมเพลงที่ตนเข้าร่วมการซ้อม

$$a_{dki} \geq replay_{dki} \qquad \forall d\ in\ \{1, \dots, q\}, k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\} \qquad \text{.....(14)}$$

$$l_{dki} \geq replay_{dki} \qquad \forall d\ in\ \{1, \dots, q\}, k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\} \qquad \text{.....(15)}$$

ข้อจำกัด (16) แสดงสถานะของนักดนตรีที่ต้องทำการรอ หากว่าอยู่ในสถานที่ซ้อม ขณะที่ทำการซ้อมเพลงที่ตนไม่ได้เข้าร่วม

$$r_{dki} - w_{dki} \leq replay_{dki} \qquad \forall d\ in\ \{1, \dots, q\}, k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\} \qquad \text{.....(16)}$$

เช่น หากนักดนตรีคนหนึ่งอยู่ในสถานที่ซ้อมตั้งแต่ช่วงเวลา (slot) ที่ 3 จนถึง ช่วงเวลาที่ 7 แต่เข้าร่วมการซ้อมในช่วงเวลาที่ 3,4 และ 7ค่าของ $replay_{dki}$, r_{dki} และ w_{dki} จะมีค่าดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างสำหรับตัวแปร $replay_{dki}$, r_{dki} และ w_{dki}

slot	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$replay$	0	0	1	1	0	0	1	0	0
r	0	0	1	1	1	1	1	0	0
w	0	0	0	0	1	1	0	0	0

ข้อจำกัด (17) แสดงข้อกำหนดจำนวนวันโดยรวมที่นักดนตรีเข้าร่วมการซ้อม

$$\sum_{d=1}^{q}\sum_{k=1}^{p} stay_{dk} \leq z1 \qquad \text{.....(17)}$$

ข้อจำกัด (18) ถึง (22) แสดงขอบเขตของตัวแปรในแบบจำลองส่วนที่ 2 ซึ่งเป็นตัวแปรฐานสอง (binary variables)

$$a_{dki} = \{0,1\} \qquad \forall d\ in\ \{1,\dots,q\}, k\ in\ \{1,\dots p\}, i\ in\ \{1,\dots,n\} \qquad \text{.....(18)}$$

$$l_{dki} = \{0,1\} \qquad \forall d\ in\ \{1,\dots,q\}, k\ in\ \{1,\dots p\}, i\ in\ \{1,\dots,n\} \qquad \text{.....(19)}$$

$$r_{dki} = \{0,1\} \qquad \forall d\ in\ \{1,\dots,q\}, k\ in\ \{1,\dots p\}, i\ in\ \{1,\dots,n\} \qquad \text{.....(20)}$$

$$w_{dki} = \{0,1\} \qquad \forall d\ in\ \{1,\dots,q\}, k\ in\ \{1,\dots p\}, i\ in\ \{1,\dots,n\} \qquad \text{.....(21)}$$

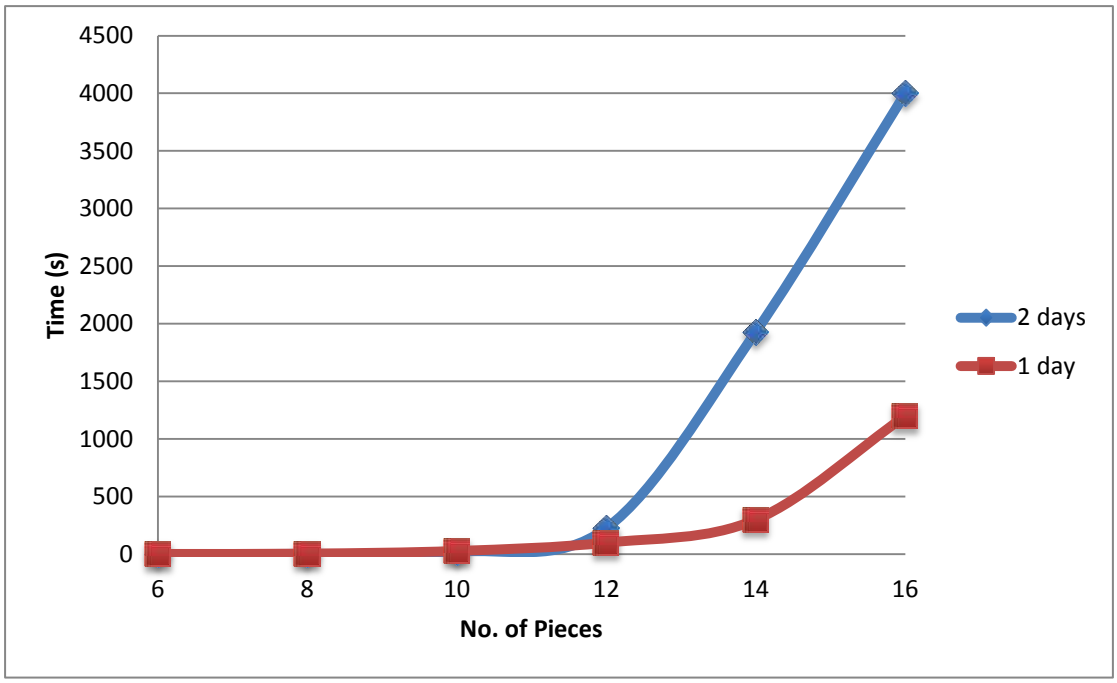
ข้อจำกัด (22) แสดงขอบเขตตัวแปรในแบบจำลองส่วนที่ 2 มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

$$z2 \geq 0 \qquad \text{.....(22)}$$

3.3 วิธีการที่นำเสนอ

การแก้ปัญหาการจัดตารางการซ้อมดนตรีซึ่งทำการศึกษาในกรณีที่ทุกเพลงมีความยาวเท่ากันด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์นั้น การแก้ปัญหาทั้งสองส่วนด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้เวลามากและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่ขนาดปัญหาใหญ่ขึ้นเนื่องจากจำนวนเพลงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3.1 หากพิจารณาจากรูปพบว่า หากจำนวนเพลงและวันซ้อมเพิ่มมากขึ้น เวลาในการหาคำตอบจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก ฉะนั้นหากเราสามารถลดขนาดปัญหาให้มีจำนวนเพลงน้อยลงและลดจำนวนวันซ้อมให้เหลือ 1 วัน จะทำให้แก้ปัญหาได้เร็วขึ้นมาก

เพื่อลดเวลาในการแก้ปัญหาลงจึงสร้างวิธีการทางฮิวริสติกส์สำหรับแก้ปัญหาในส่วนแรกซึ่งเป็นการจัดสรรเพลงสำหรับการซ้อมในแต่ละวันเพื่อให้มีจำนวนวันโดยรวมที่นักดนตรีแต่ละคนต้องมาสถานที่ซ้อมน้อยที่สุด และนอกจากการแก้ปัญหาด้วยวิธีการทางฮิวริสติกส์นี้จะใช้เวลาน้อยกว่าการแก้ปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วยังให้ผลคำตอบได้หลายคำตอบ ต่างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งให้คำตอบเพียงคำตอบเดียว ทำให้สามารถลดเวลาในการแก้ปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแก้ปัญหาในส่วนที่สองลงได้ เนื่องจากการแก้ปัญหาในส่วนที่สองโดยอาศัยผลคำตอบจากวิธีการทางฮิวริสติกส์นี้สามารถแก้ปัญหาโดยแยกปัญหาเดิมซึ่งมีการซ้อมหลายวันออกเป็นปัญหาละ 1 วันซึ่งมีขนาดเล็กกว่าปัญหาเดิมมาก เช่น หากเดิมมีปัญหาจัดตารางการซ้อมที่มีจำนวนเพลงเท่ากับ 14 เพลง มีนักดนตรี 10 คนและแบ่งการซ้อมออกเป็น 2 วัน เมื่อทำการแก้ปัญหาด้วยวิธีการทางฮิวริสติกส์ สมมติว่าได้คำตอบซึ่งมีจำนวนวันที่นักดนตรีเข้าร่วมซ้อมทั้งหมดเท่ากับ 18 วันซึ่งเป็นค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดจากฮิวริสติกส์ทั้งหมด 50 คำตอบ จะเปลี่ยนปัญหาในส่วนที่สอง จากปัญหาขนาดจำนวนเพลง 14 เพลง และเวลาซ้อม 2 วัน 1 ปัญหา ซึ่งใช้เวลาในการหาคำตอบประมาณ 4000 วินาที ลดลงเป็นปัญหาขนาด 7 เพลงที่มีเวลาซ้อม 1 วัน ประมาณ100 ปัญหา และใช้เวลาในการหาคำตอบสำหรับปัญหาย่อยปัญหาละประมาณ 5 วินาที รวมใช้เวลาในการหาคำตอบประมาณ 500 วินาที เป็นต้น ซึ่งการแยกปัญหาขนาดใหญ่ออกเป็นปัญหาขนาดเล็กหลายปัญหานี้ช่วยลดเวลาในการหาคำตอบลงได้มาก



ภาพที่ 3.1 จำนวนเพลงและเวลาที่ใช้ในการแก้ปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.3.1 วิธีการทางฮิวริสติกส์สำหรับจัดเพลงลงวันซ้อม

วิธีการทางฮิวริสติกส์ที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อจัดสรรเพลงสำหรับการซ้อมในแต่ละวันนี้มีพื้นฐานมาจากแนวคิดในการออกแบบการผลิตแบบเซลล์ แนวคิดในการพัฒนาวิธีการฮิวริสติกส์นี้ ประกอบด้วย 3 ประเด็นหลัก ประเด็นแรกคือการมุ่งความสนใจไปที่เพลงที่นักดนตรีจำนวนมาก “ไม่มี” ส่วนเกี่ยวข้อง หรือ มุ่งความสนใจไปที่เพลงที่มีนักดนตรีร่วมบรรเลงน้อย เพื่อให้การจัดเพลงลงวันซ้อมพยายามรวบรวมเพลงที่มีคนเล่นน้อยอยู่ในวันเดียวกันเพื่อลดจำนวนนักดนตรีที่ต้องเข้าร่วมการซ้อมในวันนั้น แนวคิดนี้ส่งผลให้เกิดการสลับค่าในตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพลงและนักดนตรี (bit flip) นั่นคือ จากเดิม 1 ในตารางดังกล่าวแสดงว่า นักดนตรีจะต้องเล่นเพลงนั้น และ 0 แสดงว่านักดนตรีไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับเพลงนั้น หลังจากสลับค่าแล้ว ในตารางหลังการสลับค่า เลข 1 แสดงว่านักดนตรีไม่มีส่วนร่วมในเพลงนั้น และในทางตรงกันข้าม 0 แสดงว่านักดนตรีจะต้องเล่นเพลงนั้น จากตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพลงและนักดนตรีในตารางที่ 3.1 สามารถทำการสลับค่าได้ผลดัง ตารางหลังการสลับค่าแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างตารางหลังการสลับค่า

piece	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	player coef
player 1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0
player 2	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0
player 3	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0
player 4	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1
player 5	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1
player 6	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
player 7	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0
player 8	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0
player 9	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1
player 10	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0

ประเด็นต่อมาในการพัฒนาฮิวริสติกส์คือ การให้ความสนใจเฉพาะนักดนตรีที่มีโอกาสจะไม่เข้าการซ้อมอย่างน้อย 1 วัน จากตัวอย่างข้างต้น สมมติให้การซ้อมออกเป็น 2 วัน โดยแต่ละวันมีเวลาในการซ้อมเท่ากับ 7 ช่วงเวลา (slot) นั่นคือจะมีการซ้อมเพลงทั้งสิ้น 7 เพลงต่อการซ้อม 1 วัน เนื่องจากนักดนตรีคนที่ 4 ไม่ต้องเข้าร่วมการซ้อมของเพลงทั้งหมด 7 เพลง ดังนั้นจึงมีโอกาสที่จะจัดสรรเพลงเพื่อให้นักดนตรีคนที่ 4 มีวันที่ไม่ต้องเข้าร่วมการซ้อมได้ 1 วัน ในทางตรงข้ามหากพิจารณานักดนตรีคนที่ 1 ซึ่งต้องเข้าร่วมการซ้อมทั้งสิ้น 9 เพลง และมีเพลงที่ไม่ต้องเข้าร่วมเพียง 5 เพลง ดังนั้นไม่ว่าจะจัดตารางอย่างไร นักดนตรีคนที่ 1 ก็จำเป็นต้องเข้าร่วมการซ้อมทั้งสองวัน จากแนวคิดดังกล่าว นักดนตรีซึ่งมีโอกาสจะไม่เข้าร่วมการซ้อมอย่างน้อย 1 วัน จะกำหนดให้มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 1 และนักดนตรีที่จำเป็นต้องเข้าร่วมการซ้อมในวันซ้อมทุกวันที่ยังไม่ได้รับการจัดสรรเพลงจะกำหนดให้มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 0 การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์นี้เป็นไปเพื่อลดการเบี่ยงเบนความสนใจจากนักดนตรีที่ต้องเข้าร่วมการซ้อมอยู่แล้ว เนื่องจากการแก้ปัญหาในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนวันที่นักดนตรีเข้าร่วมการซ้อม ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องพิจารณานักดนตรีที่ไม่มีโอกาสจะไม่เข้าซ้อม

ประเด็นสุดท้าย คือการจัดสรรเพลงที่มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกันไว้ด้วยกัน นั่นคือพยายามจัดให้เพลงที่นักดนตรีกลุ่มเดียวกันไม่ได้ร่วมบรรเลงไว้ด้วยกัน จากแนวคิดนี้จึงมีการคำนวณหาความใกล้ชิด(closeness)ระหว่างเพลงเป็นคู่ๆ ทั้งนี้ความใกล้ชิดนี้หาได้จากผลรวมของผลคูณระหว่างสมาชิกแต่ละคนของเพลงคู่ที่สนใจในตารางหลังการสลับค่าคูณด้วยสัมประสิทธิ์ของนักดนตรีแต่ละคน ตัวอย่างเช่น ถ้านักดนตรีคนหนึ่งไม่มีส่วนร่วมในเพลงที่ i และเพลงที่ j และนักดนตรีคนนี้มีสัมประสิทธิ์เท่ากับ 1 แล้วค่าความใกล้ชิดของนักดนตรีคนดังกล่าวสำหรับเพลง i และ j จะเท่ากับ 1 ดังตารางที่ 3.5 แสดงค่าความใกล้ชิด สังเกตว่า ความใกล้ชิดระหว่างเพลงที่ 2 และเพลงที่ 4 จะมีค่าเท่ากับ 2 หากไม่พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของนักดนตรีโดยมีนักดนตรีที่ไม่เข้าร่วมการซ้อมตรงกันคือนักดนตรีคนที่ 3 และ 9 แต่เนื่องจากในกรณีนี้นักดนตรีคนที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 0 ค่าความใกล้ชิดจึงมีค่าเท่ากับ 1 หลังจากคำนวณค่าความใกล้ชิดแล้ว เพลงต่างๆจะได้รับการจัดสรรตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

ก่อนจัดตารางซ้อมดนตรีจะทำการคำนวณความใกล้ชิดระหว่างเพลงก่อน แล้วจัดเรียงเพลงที่มีความใกล้ชิดสูงที่สุดลงตารางก่อนโดยเริ่มจากวันแรก โดยจากตารางที่ 3.5 ค่าความใกล้ชิดสูงที่สุดคือ 23 ซึ่งมีเพลงที่มีค่าความใกล้ชิดเท่ากับ 23 หลายเพลง จึงเลือกเพลงที่ 1 จัดลงในตารางเนื่องจากมีค่าความใกล้ชิดสูงที่สุดและเป็นเพลงที่อยู่ในลำดับแรก จากนั้นจัดเพลงทีมีความใกล้ชิดกับเพลงที่ 1 สูงที่สุดลงในตารางเป็นเพลงต่อไป ได้แก่เพลงที่ 8 ซึ่งมีค่าความใกล้ชิดกับเพลงที่ 1 เท่ากับ 3 และอยู่ในลำดับก่อนหน้าเพลงที่ 11 และ 13 ซึ่งมีค่าความใกล้ชิดกับเพลงที่ 1 เท่ากับ 3 เท่ากันจากนั้นจึงเลือกเพลงที่มีความใกล้ชิดกับเพลงที่ 1 และเพลงที่ 8 มากที่สุดและอยู่ในลำดับแรกสุด ซึ่งได้แก่เพลงที่ 11 จากนั้นเลือกเพลงจากผลรวมความใกล้ชิดของเพลงที่จัดลงในตารางการซ้อมของวันดังกล่าวแล้วต่อไปจนครบ 7 เพลง ทั้งนี้หลังจากจัดเพลงใดเพลงหนึ่งลงในตารางแล้วจะต้องทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของนักดนตรีและคำนวณค่าความใกล้ชิดระหว่างเพลงใหม่ทุกครั้งหากนักดนตรีคนใดมีส่วนร่วมบรรเลงในเพลงที่จัดลงตารางในวันนั้นแล้วค่าสัมประสิทธิ์ของนักดนตรีคนนั้นจะมีค่าเท่ากับ 0 จนกว่าการจัดตารางสำหรับวันนั้นจะสิ้นสุดลง ทั้งนี้ในการจัดตารางดังกล่าวเมื่อจัดเพลงที่ 1, 8, 11 และ 13 ลงในตารางแล้วค่าสัมประสิทธิ์ของนักดนตรีแต่ละคนยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากนักดนตรีที่ร่วมซ้อมในเพลงเหล่านี้ล้วนมีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 0 ดังตารางที่ 3.6 ซึ่งเพลงที่มีค่าความใกล้ชิดกับเพลงทั้งสี่สูงที่สุดได้แก่เพลงที่ 4 และเมื่อจัดเพลงที่ 4 ลงในตารางแล้วจะทำให้นักดนตรีคนที่ 4 ต้องเข้าร่วมซ้อมในวันดังกล่าวทำให้สัมประสิทธิ์ของนักดนตรีคนที่ 4 เปลี่ยนจาก 1 เป็น 0 ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.5 ตัวอย่างตารางแสดงค่าความใกล้ชิด

piece	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	sum closeness
1		1	1	2	1	1	2	3	0	2	3	2	3	2	23
2			0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	10
3				0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	6
4					1	1	2	2	0	1	2	1	2	2	17
5						1	1	1	0	1	1	0	1	1	10
6							1	1	0	1	1	0	1	1	10
7								2	0	1	2	1	2	2	17
8									0	2	3	2	3	2	23
9										0	0	0	0	0	0
10											2	1	2	1	16
11												2	3	2	23
12													2	1	13
13														2	23
14															17

ตารางที่ 3.6 ค่าสัมประสิทธิ์ของนักดนตรีหลังจัดเพลงที่ 1, 8, 11 และ 13 ลงในตาราง

piece	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	player coef
player 1	0							1			1		1		0
player 2	1							0			1		1		0
player 3	0							1			1		0		0
player 4	1							1			1		1		1
player 5	1							1			1		1		1
player 6	1							1			0		0		0
player 7	0							0			0		1		0
player 8	0							1			0		0		0
player 9	1							1			1		1		1
player 10	0							1			0		0		0

เมื่อจัดเพลงลงตารางในวันแรกครบแล้วจะย้ายไปจัดตารางสำหรับวันต่อไปโดยคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของนักดนตรีแต่ละคนและค่าความใกล้ชิดระหว่างเพลงอีกครั้งโดยคำนวณเฉพาะความใกล้ชิดระหว่างเพลงที่ยังไม่ได้รับการจัดตารางและเลือกเพลงที่มีค่าความใกล้ชิดเทียบกับเพลงที่เหลืออยู่สูงที่สุดเป็นเพลงแรก และทำตามขั้นตอนเดิมจนเพลงทั้งหมดถูกจัดลงตาราง

เมื่อทำการจัดตารางสิ้นสุดลง จะได้ตารางการซ้อมดังตารางที่ 3.8 โดยนักดนตรีคนที่ 5 และ 9 ไม่ต้องเข้าร่วมการซ้อมวันแรก ทั้งนี้หากทำการจัดตารางโดยไม่คำนึงถึงสัมประสิทธิ์ของนักดนตรีแล้วจะได้ตารางการซ้อมดังตารางที่ 3.9 และหากทำการจัดตารางโดยไม่คำนึงถึงสัมประสิทธิ์ของนักดนตรีและไม่ทำการสลับค่าในตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพลงและนักดนตรี (bit flip) โดยอ้างอิงจากค่าความใกล้ชิดเท่านั้น จะได้ตารางดังตารางที่ 3.10 ซึ่งทั้งสองวิธีนี้จะมีจำนวนวันที่นักดนตรีที่เข้าร่วมการซ้อมมากกว่าตารางในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.7 ค่าสัมประสิทธิ์ของนักดนตรีหลังจัดเพลงที่ 1, 8, 11, 13 และ 4 ลงในตาราง

piece	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	player coef
player 1	0			1				1			1		1		0
player 2	1			0				0			1		1		0
player 3	0			1				1			1		0		0
player 4	1			0				1			1		1		0
player 5	1			1				1			1		1		1
player 6	1			1				1			0		0		0
player 7	0			1				0			0		1		0
player 8	0			0				1			0		0		0
player 9	1			1				1			1		1		1
player 10	0			0				1			0		0		0

ตารางที่ 3.8 ผลการจัดตารางโดยวิธีการทางฮิวริสติกส์

piece	1	8	11	13	4	7	14	2	3	5	6	9	10	12
player 1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
player 2	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1
player 3	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1
player 4	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0
player 5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
player 6	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
player 7	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0
player 8	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0
player 9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
player 10	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0

ตารางที่ 3.9 ผลการจัดตารางโดยไม่คำนึงถึงสัมประสิทธิ์ของนักดนตรี

piece	8	4	11	13	1	12	7	2	3	5	6	9	10	14
player 1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
player 2	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1
player 3	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0
player 4	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1
player 5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
player 6	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1
player 7	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1
player 8	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0
player 9	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
player 10	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0

ตารางที่ 3.10 ผลการจัดตารางโดยอ้างอิงจากค่าความใกล้ชิดเท่านั้น

piece	2	3	9	5	6	10	1	4	7	8	11	12	13	14
player 1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1
player 2	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1
player 3	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
player 4	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1
player 5	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
player 6	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
player 7	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1
player 8	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0
player 9	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
player 10	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0

เพื่อให้ได้วิธีการจัดเพลงลงในตารางการซ้อมที่แตกต่างกัน (alternative solution) ขั้นตอนต่อมาจะทำการเลือกเพลงโดยการสุ่มลงในตารางก่อน จากนั้นจึงทำการจัดตารางตามขั้นตอนจนได้ตารางซ้อมที่สมบูรณ์ ทำซ้ำขั้นตอนการสุ่มเพลงนี้จนกระทั่งครบรอบในการสุ่มที่กำหนดไว้

3.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับจัดลำดับเพลงภายในการซ้อมแต่ละวัน

เมื่อทำการจัดสรรเพลงสำหรับการซ้อมแต่ละวันเสร็จสิ้นแล้ว จะนำคำตอบที่ได้ทั้งมาจัดลำดับเพลงในแต่ละวันเพื่อหาลำดับเพลงที่ทำให้นักดนตรีต้องใช้ในการรอซ้อมขณะที่อยู่ในสถานที่ซ้อมแล้วน้อยที่สุด โดยหากจำนวนเพลงในแต่ละวันมีน้อยกว่า 9 เพลงสามารถใช้การสลับตำแหน่ง (permutation) เพื่อหาคำตอบได้เลย แต่หากจำนวนเพลงมี 9 เพลงขึ้นไปแล้วการสลับตำแหน่ง (permutation) จะใช้เวลามากเกินไป การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยหาคำตอบจะมีความเหมาะสมมากกว่า โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแก้ปัญหาในส่วนที่สองภายหลังหาคำตอบด้วยวิธีการฮิวริสติกส์มีลักษณะคล้ายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้กล่าวถึงได้ตอนต้น แต่มีการปรับลดฟังก์ชันข้อจำกัดบางฟังก์ชันลง และตัดทอนมิติของจำนวนวันออก ดังต่อไปนี้

ค่าดัชนี (Index)

i = 1, . . ., n n = จำนวนช่วงเวลา (slot) ที่ทำการซ้อม

j = 1, . . ., m m = จำนวนเพลงที่ต้องทำการซ้อม

k = 1, . . .,p p = จำนวนนักดนตรีทั้งหมด

ค่าพารามิเตอร์ (Parameter)

play_{kj} = 1 ถ้านักดนตรี k ต้องเล่นเพลงที่ j

= 0 ถ้านักดนตรี k ไม่ต้องเล่นเพลงที่ j

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable)

a_{ki} = 1 ถ้านักดนตรี k มาถึงในช่วงเวลา (slot) ที่ i

= 0 ถ้านักดนตรี k ยังมาไม่ถึงสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i

l_{ki} = 1 ถ้านักดนตรี k ยังไม่ออกจากสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i

= 0 ถ้านักดนตรี k ออกจากสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i

r_{ki} = 1 ถ้านักดนตรี k อยู่ในสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i

= 0 ถ้านักดนตรี k ไม่อยู่ในสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i

w_{ki} = 1 ถ้านักดนตรี k อยู่ในสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i โดยไม่ร่วมการซ้อม

= 0 ถ้านักดนตรี k อยู่ในสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i และเข้าร่วมการซ้อม

$\mathrm{replay_{ki}}$ = 1 ถ้านักดนตรี k ต้องซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i

= 0 ถ้านักดนตรี k ไม่ต้องซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i

$\mathrm{timetable_{ij}}$ = 1 ถ้าเพลงที่ j ทำการซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i

= 0 ถ้าเพลงที่ j ไม่มีซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i

z = เวลาทั้งหมดที่นักดนตรีอยู่ในสถานที่ซ้อมโดยที่ไม่ได้ทำการซ้อม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สมการ (23) สมการวัตถุประสงค์สำหรับการหาคำตอบในส่วนที่ 1 สำหรับหาเวลาทั้งหมดที่นักดนตรีอยู่ในสถานที่ซ้อมโดยที่ไม่ได้ทำการซ้อม

สมการวัตถุประสงค์ (Objective Function)

Minimize $z = \sum_{k=1}^{p} \sum_{i=1}^{n} w_{ki}$ .....(23)

ฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraint Function)

ข้อจำกัด (24) และ (25) แสดงการซ้อมจะต้องทำการซ้อมครบทุกเพลงโดยที่แต่ละเพลงต้องไม่มีการซ้อมซ้อนทับกัน

$$\sum_{i=1}^{n} timetable_{ij} = 1 \qquad \forall j \; in \; \{1, \dots, m\} \qquad \text{.....(24)}$$

$$\sum_{j=1}^{m} timetable_{ij} \leq 1 \qquad i \; in \; \{1, \dots, n\} \qquad \text{.....(25)}$$

ข้อจำกัด (26) แสดงการแจกแจงข้อกำหนดในการซ้อมในแต่ละช่วงเวลา (slot) สำหรับนักดนตรีแต่ละคน

$$replay_{ki} = \sum_{j=1}^{m} timetable_{ij} \times play_{kj}$$

$$k \; in \; \{1, \dots p\}, i \; in \; \{1, \dots, n\}$$

.....(26)

ข้อจำกัด (27) ถึง (29) แสดงสถานะนักดนตรีอยู่ในสถานที่ซ้อมหลังจากมาถึงแล้วและยังไม่กลับ

$$r_{ki} \geq a_{ki} + l_{ki} - 1 \qquad k \; in \; \{1, \dots p\}, i \; in \; \{1, \dots, n\}$$

.....(27)

$$a_{ki} \leq a_{k(i+1)} \qquad k \; in \; \{1, \dots p\}, i \; in \; \{1, \dots, n-1\}$$

.....(28)

$$l_{ki} \geq l_{k(i+1)} \qquad k \; in \; \{1, \dots p\}, i \; in \; \{1, \dots, n-1\}$$

.....(29)

ข้อจำกัด (30) และ (31) แสดงข้อกำหนดให้นักดนตรีต้องอยู่ในสถานที่ซ้อม ขณะที่มีซ้อมเพลงที่ตนเข้าร่วมการซ้อม

$$a_{ki} \geq replay_{ki} \qquad k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\} \qquad \text{.....(30)}$$

$$l_{ki} \geq replay_{ki} \qquad k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\} \qquad \text{.....(31)}$$

ข้อจำกัด (32) แสดงสถานะของนักดนตรีที่ต้องทำการรอ หากว่าอยู่ในสถานที่ซ้อม ขณะที่ทำการซ้อมเพลงที่ตนไม่ได้เข้าร่วม

$$r_{ki} - w_{ki} \leq replay_{ki} \qquad k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\} \qquad \text{.....(32)}$$

ข้อจำกัด (33) ถึง (38) แสดงขอบเขตของตัวแปรในแบบจำลองซึ่งเป็นตัวแปรฐานสอง (binary variables)

$$replay_{ki} = \{0, 1\} \qquad \forall k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\} \qquad \text{.....(33)}$$

$$timetable_{ij} = \{0, 1\} \qquad \forall i\ in\ \{1, \dots, n\},\ j\ in\ \{1, \dots, m\} \qquad \text{.....(34)}$$

$$a_{ki} = \{0, 1\} \qquad \forall k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\} \qquad \text{.....(35)}$$

$$l_{ki} = \{0, 1\} \qquad \forall k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\} \qquad \text{.....(36)}$$

$$r_{ki} = \{0, 1\} \qquad \forall k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\} \qquad \text{.....(37)}$$

$$w_{ki} = \{0, 1\} \qquad \forall k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\} \qquad \text{.....(38)}$$

ข้อจำกัด (39) แสดงขอบเขตตัวแปรในแบบจำลองซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

$$z \geq 0 \qquad \text{.....(39)}$$

3.4 ผลการวิจัย

หัวข้อนี้แสดงผลการวิจัยโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าวัตถุประสงค์และเวลาในการหาคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการฮิวริสติกส์ โดยปัญหาตัวอย่างที่ทำการวิจัยสร้างขึ้นโดยการสุ่ม แบ่งออกเป็น 8 ขนาดโดยแบ่งเป็นจำนวนเพลงเท่ากับ 10, 12, 14 และ 16 เพลง และจำนวนวันที่ทำการซ้อมเท่ากับ 2 และ 3 วัน ปัญหาแต่ละขนาดประกอบด้วยตัวอย่างซึ่งทำการสุ่มขนาดละ 10 ตัวอย่าง ผลการวิจัยสำหรับปัญหาส่วนแรก คือการหาจำนวนวันที่นักดนตรีเข้าร่วมซ้อมทั้งหมดที่น้อยที่สุด แสดงในตารางที่ 3.11 พบว่าวิธีการฮิวริสติกส์ให้ค่าวัตถุประสงค์เท่ากับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในทุกปัญหาตัวอย่าง โดยที่ใช้เวลาในการหาคำตอบต่ำกว่าสำหรับทุกปัญหา นอกจากนี้ ผลการวิจัยสำหรับการแก้ปัญหาทั้งสองส่วน พบว่าวิธีการฮิวริสติกส์ใช้เวลาในการหาคำตอบต่ำกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทุกปัญหา และสามารถให้ค่าวัตถุประสงค์ทั้งสองส่วนเท่ากับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับปัญหาที่มีจำนวนเพลงเท่ากับ 10 ถึง 16 เพลงและมีจำนวนวันที่ทำการซ้อม 2 วัน และปัญหาที่มีจำนวนเพลงเท่ากับ 10 ถึง 14 เพลงและมีจำนวนวันที่ทำการซ้อม 3 วัน ส่วนปัญหาที่มีจำนวนเพลงเท่ากับ 16 เพลงและแบ่งการซ้อมออกเป็น 3 วัน เนื่องจากการจำกัดเวลาในการหาคำตอบไว้ที่ 2 ชั่วโมง ทำให้มีเพียงตัวอย่างที่ 9 เพียงตัวอย่างเดียวที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบคำตอบที่ดีที่สุด โดยวิธีการฮิวริสติกส์ให้คำตอบได้เท่ากับแบบจำลองคณิตศาสตร์ทุกตัวอย่าง ยกเว้นตัวอย่างที่ 5 และ 6 ซึ่งวิธีการฮิวริสติกส์ให้คำตอบดีกว่าคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และทั้งสองตัวอย่างให้ค่าวัตถุประสงค์ดีกว่าร้อยละ 14.29 และร้อยละ 28.57 ตามลำดับ ผลการวิจัยโดยเปรียบเทียบระหว่างเวลาในการหาคำตอบจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ และวิธีการฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาทั้งสองส่วน แสดงในตารางที่ 3.12 และผลการวิจัยโดยเปรียบเทียบระหว่างค่าวัตถุประสงค์จากแบบจำลองคณิตศาสตร์และวิธีการฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาทั้งสองส่วน แสดงในตารางที่ 3.13

ตารางที่ 3.11 ผลการวิจัยโดยเปรียบเทียบระหว่างค่าวัตถุประสงค์และเวลาในการหาคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาส่วนแรก

Problem Size			Average Elapsed Time (s)			Objective Difference (%)		
No. of Piece	No. of Player	No. of Day	IP	Heuristics	Difference (%)	min	max	average
10	10	2	3.45	1.76	49.13	0	0	0
12	10	2	4.40	3.21	27.17	0	0	0
14	10	2	5.85	5.08	13.20	0	0	0
16	10	2	8.04	7.34	8.70	0	0	0
10	10	3	4.24	3.06	27.92	0	0	0
12	10	3	5.25	3.75	28.45	0	0	0
14	10	3	8.51	7.86	7.73	0	0	0
16	10	3	17.73	13.28	25.07	0	0	0

ตารางที่ 3.12 ผลการวิจัยโดยเปรียบเทียบระหว่างเวลาในการหาคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
และวิธีการที่นำเสนอสำหรับปัญหาทั้งสองส่วน

Problem Size			Average IP Elapsed Time (s)			Average Proposed Methodology Elapsed Time (s)			
No. of Piece	No. of Player	No. of Day	Stage 1	Stage 2	Total	Stage 1	Stage 2	Total	Difference (%)
10	10	2	3.45	19.97	23.42	2.85	0.65	3.50	85.05
12	10	2	4.40	226.17	230.57	5.36	6.37	11.73	94.91
14	10	2	5.85	1930.48	1936.33	8.91	63.00	71.91	96.29
16	10	2	8.04	3569.18	3577.22	46.84	516.14	562.98	84.26
10	10	3	4.24	86.04	90.28	3.39	0.07	3.46	96.17
12	10	3	5.25	111.90	117.15	4.43	0.16	4.59	96.08
14	10	3	8.51	5421.27	5429.79	8.75	1.19	9.94	99.82
16	10	3	17.73	6996.96	7014.69	124.52	35.37	159.89	97.72

ตารางที่ 3.13 ผลการวิจัยโดยเปรียบเทียบระหว่างค่าวัตถุประสงค์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
และวิธีการที่นำเสนอสำหรับปัญหาทั้งสองส่วน

Problem Size			Stage 1 Objective Difference (%)			Stage 2 Objective Difference (%)		
No. of Piece	No. of Player	No. of Day	min	max	average	min	max	average
10	10	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	10	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	10	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	10	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	10	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	10	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	10	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	10	3	0.00	0.00	0.00	-28.57	0.00	-5.54

บทที่ 4
วิธีการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัยกรณีที่เพลงมีความยาวแตกต่างกัน

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดและขั้นตอนในการวิจัย แนวคิดในการพัฒนาวิธีการจัดตารางการซ้อมดนตรี รวมถึงผลการวิจัยในกรณีที่เพลงมีความยาวแตกต่างกัน งานวิจัยในส่วนนี้ยังคงแบ่งปัญหาออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการจัดสรรเพลงสำหรับการซ้อมในแต่ละวันเพื่อให้มีจำนวนวันโดยรวมที่นักดนตรีแต่ละคนต้องมาสถานที่ซ้อมน้อยที่สุดโดยใช้วิธีการฮิวริสติกส์ที่พัฒนาขึ้นโดยมีพื้นฐานจากการออกแบบการผลิตแบบเซลล์ จากนั้นแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นจะนำมาใช้ในส่วนที่สองเพื่อหาการจัดลำดับเพลงเพื่อให้เวลาทั้งหมดที่นักดนตรีอยู่ในสถานที่ซ้อมโดยที่ไม่ได้ทำการซ้อมมีค่าน้อยที่สุด

4.1 ลักษณะของปัญหาที่ทำการศึกษา

ปัญหาการจัดตารางการซ้อมดนตรีซึ่งทำการศึกษานั้น แบ่งการซ้อมออกเป็นหลายวัน แต่ละวันมีเวลาในการซ้อมเท่ากันและความยาวโดยรวมของเพลงที่ทำการซ้อมในวันนั้นๆจะต้องไม่เกินเวลาดังกล่าว เพลงที่ทำการซ้อมแต่ละเพลงมีความยาวในการซ้อมแตกต่างกัน และมีนักดนตรีที่ต้องเข้าร่วมการซ้อมแตกต่างกันไป ทั้งนี้นักดนตรีจะต้องมาสถานที่ซ้อมเฉพาะวันที่มีเพลงที่ตนมีส่วนร่วมทำการซ้อมเท่านั้น นอกจากนี้นักดนตรีจะต้องมาถึงสถานที่ซ้อมก่อนที่เพลงแรกที่ตนมีส่วนร่วมในวันนั้นเริ่มทำการซ้อม และจะออกจากสถานที่ซ้อมได้ต่อเมื่อการซ้อมของเพลงสุดท้ายที่ตนมีส่วนร่วมสิ้นสุดลง การจัดสรรเพลงสำหรับการซ้อมในแต่ละวัน และการจัดลำดับเพลงที่ทำการซ้อมในวันนั้นๆ มีวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนวันโดยรวมซึ่งนักดนตรีต้องอยู่ในสถานที่ซ้อม และลดเวลาซึ่งนักดนตรีที่อยู่ในสถานที่ซ้อมต้องรอในขณะที่วงดนตรีทำการซ้อมเพลงที่ตนไม่มีส่วนร่วม

4.1.1 ปัญหาของวงดนตรีกรณีศึกษา

วงดนตรีวงหนึ่งมีสมาชิก p คน ในการแสดงคอนเสิร์ตครั้งหนึ่งมีเพลงที่ใช้ในการบรรเลง m เพลง โดยแบ่งการซ้อมออกเป็น q ครั้ง แต่ละวันมีแบ่งเวลาในการซ้อมออกเป็นช่วงเวลา (slot) จำนวน n หน่วย โดยการซ้อมแต่ละเพลงมีความยาวในการซ้อมแตกต่างกันตั้งแต่ 1 ถึง 4 slot และมีนักดนตรีที่ต้องเข้าร่วมการซ้อมแตกต่างกัน ดังตัวอย่างแสดงตารางความสัมพันธ์ระหว่าง

เพลงและนักดนตรีรวมถึงความยาวในการซ้อมของแต่ละเพลงในภาพที่ 4.1 และในการซ้อมแต่ละครั้งนักดนตรีจะต้องมาถึงสถานที่ซ้อมก่อนการซ้อมในเพลงที่ตนต้องเล่นจะเริ่มและกลับจากสถานที่ซ้อมหลังจากเพลงสุดท้ายที่ตนต้องเล่นซ้อมเสร็จ ทั้งนี้เพลงใดที่จำเป็นต้องซ้อมหลายครั้งจะแยกออกเป็นหลายเพลงในตารางรายละเอียดเพลงดังกล่าว เช่น หากมีเพลง 5 เพลงที่ต้องซ้อมโดยแต่ละเพลงต้องซ้อม 3 วัน ดังนั้นตารางความสัมพันธ์ระหว่างเพลงและนักดนตรีก็จะมีรายชื่อเพลงทั้งหมด 15 เพลง เป็นต้น โดยปัญหาที่ต้องการศึกษานั้นแบ่งการซ้อมออกเป็น 5 วัน มีเพลงที่ต้องซ้อมจำนวน 40 เพลง และมีนักดนตรี 20 คน ทั้งนี้แบบจำลองคณิตศาสตร์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน เช่นเดียวกับวิธีการจัดตารางการซ้อมดนตรี ในกรณีที่เพลงมีความยาวเท่ากัน คือส่วนแรกทำการหาจำนวนวันโดยรวมที่นักดนตรีเข้าร่วมการซ้อม แล้วนำคำตอบที่ได้มากำหนดเป็นเงื่อนไขสำหรับการหาเวลาทั้งหมดที่นักดนตรีอยู่ในสถานที่ซ้อมโดยที่ไม่ได้ทำการซ้อมในส่วนที่สอง โดยสำหรับปัญหาการจัดตารางในกรณีที่เพลงมีความยาวไม่เท่ากันนี้มีตัวแปรและสมการข้อจำกัดสำหรับหาคำตอบเพิ่มเติมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดตารางการซ้อมดนตรี ในกรณีที่เพลงมีความยาวเท่ากัน ได้แก่ข้อจำกัดที่ (6) ถึงข้อจำกัดที่ (10) เนื่องจากหากหาคำตอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาที่เพลงมีความยาวเท่ากันแล้วมักจะได้คำตอบสำหรับส่วนแรกซึ่งเป็นคำตอบที่ละเมิดข้อกำหนดที่ว่าการซ้อมแบ่งออกเป็นหลายวัน แต่ละวันมีเวลาในการซ้อมเท่ากันและความยาวโดยรวมของเพลงที่ทำการซ้อมในวันนั้นๆจะต้องไม่เกินเวลาดังกล่าว เช่น หากหาคำตอบสำหรับปัญหาในตารางที่ 4.1 ซึ่งตามปกติแล้วเมื่อผลรวมของความยาวเพลงทั้งหมดเท่ากับ 38 หน่วยหากแบ่งการซ้อมเป็น 2 วัน แต่ละวันจะมีเวลาที่อนุญาตให้ทำการซ้อมได้เท่ากับ 19 หน่วย แต่ถ้าคำตอบที่หาได้ได้แก่ เพลงที่ 1, 4, 7, 8, 11 และ 12 ซ้อมในวันแรก และเพลงที่ 2, 3, 5, 6, 9 และ 10 ซ้อมในวันที่สอง ผลรวมเวลาที่ทำการซ้อมในวันแรกจะเท่ากับ 23 หน่วย และผลรวมเวลาในวันที่สองเท่ากับ 15 หน่วย ซึ่งผลรวมเวลาที่ทำการซ้อมในวันแรกมีค่าเกินเวลาที่อนุญาตให้ทำการซ้อมได้จึงถือเป็นคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ ด้วยหตุผลนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงต้องเพิ่มเติมฟังก์ชันข้อจำกัดเพื่อให้แบบจำลองพิจารณาถึงความยาวเพลงที่แตกต่างกันด้วย นอกจากนี้บางปัญหาอาจไม่มีคำตอบที่เป็นไปได้อยู่เลยก็ได้ ทั้งนี้ตัวอย่างปัญหาที่นำมาทดสอบนี้ล้วนมีคำตอบที่เป็นไปได้ทุกตัวอย่าง

ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างตารางความสัมพันธ์ระหว่างเพลงและนักดนตรี

piece	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
player 1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0
player 2	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1
player 3	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1
player 4	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0
player 5	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0
player 6	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1
player 7	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0
player 8	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0
player 9	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
player 10	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0
duration	4	4	2	4	2	1	4	3	2	4	4	4

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ค่าดัชนี (Index)

i = 1, . . ., n n = จำนวนช่วงเวลา (slot) ที่ทำการซ้อม

j = 1, . . ., m m = จำนวนเพลงที่ต้องทำการซ้อม

k = 1, . . .,p p = จำนวนนักดนตรีทั้งหมด

d = 1, . . ., q q = จำนวนวันที่ทำการซ้อม

ค่าพารามิเตอร์ (Parameter)

$play_{kj}$ = 1 ถ้านักดนตรี k ต้องเล่นเพลงที่ j

= 0 ถ้านักดนตรี k ไม่ต้องเล่นเพลงที่ j

$dura_j$ = ความยาวของเพลง j (ช่วงเวลา)

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable)

a_{dki} = 1 ถ้านักดนตรี k มาถึงในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

= 0 ถ้านักดนตรี k ยังมาไม่ถึงสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

l_{dki} = 1 ถ้านักดนตรี k ยังไม่ออกจากสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

= 0 ถ้านักดนตรี k ออกจากสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

r_{dki} = 1 ถ้านักดนตรี k อยู่ในสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

= 0 ถ้านักดนตรี k ไม่อยู่ในสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

w_{dki} = 1 ถ้านักดนตรี k อยู่ในสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d โดยไม่ร่วมการซ้อม

= 0 ถ้านักดนตรี k อยู่ในสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d และเข้าร่วมการซ้อม

$replay_{dki}$ = 1 ถ้านักดนตรี k ต้องซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

= 0 ถ้านักดนตรี k ไม่ต้องซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

$timestart_{dij}$ = 1 ถ้าเพลงที่ j มีการเริ่มซ้อมแล้วเมื่อถึงช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

= 0 ถ้าเพลงที่ j ยังไม่มีการเริ่มซ้อมเมื่อถึงช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

$timeend_{dij}$ = 1 ถ้าเพลงที่ j ยังไม่สิ้นสุดซ้อมเมื่อถึงช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

= 0 ถ้าเพลงที่ j สิ้นสุดการซ้อมแล้วเมื่อถึงช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

$timetable_{dij}$ = 1 ถ้าเพลงที่ j ทำการซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

= 0 ถ้าเพลงที่ j ไม่มีซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i ของวันที่ d

$stay_{dk}$ = 1 ถ้านักดนตรี k เข้าร่วมการซ้อมในวันที่ d

= 0 ถ้านักดนตรี k ไม่เข้าร่วมการซ้อมในวันที่ d

y_{dj} = 1 ถ้าเพลงที่ j ทำการซ้อมในวันที่ d

= 0 ถ้าเพลงที่ j ไม่ทำการซ้อมในวันที่ d

$z1$ = จำนวนวันโดยรวมที่นักดนตรีเข้าร่วมการซ้อม ซึ่งหาได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ส่วนที่ 1

$z2$ = เวลาทั้งหมดที่นักดนตรีอยู่ในสถานที่ซ้อมโดยที่ไม่ได้ทำการซ้อม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ส่วนที่ 1

สมการ (40) สมการวัตถุประสงค์สำหรับการหาคำตอบในส่วนที่ 1 สำหรับหาจำนวนวันที่นักดนตรีเข้าร่วมซ้อมทั้งหมด

สมการวัตถุประสงค์ (Objective Function)

Minimize $z1 = \sum_{d=1}^{q} \sum_{k=1}^{p} stay_{dk}$ .....(40)

ฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraint Function)

ข้อจำกัด (41) ถึง (43) แสดงการซ้อมในแต่ละเพลงต้องไม่มีการซ้อนทับกันภายในช่วงเวลาเดียวกัน และเวลารวมในการซ้อมทั้งหมดเท่ากับเวลาที่ต้องการในการซ้อม

$\sum_{i=1}^{n} timetable_{dij} = y_{dj} \times dura_j \quad \forall d\ in\ \{1, \dots, q\}, j\ in\ \{1, \dots, m\}$ .....(41)

$\sum_{j=1}^{m} timetable_{dij} \leq 1 \quad \forall d\ in\ \{1, \dots, q\}, i\ in\ \{1, \dots, n\}$ .....(42)

$\sum_{d=1}^{q} y_{dj} = 1 \quad \forall j\ in\ \{1, \dots, m\}$ .....(43)

ข้อจำกัด (44) แสดงการแจกแจงข้อกำหนดในการซ้อมในแต่ละช่วงเวลา (slot) สำหรับนักดนตรีแต่ละคน

$$replay_{dki} = \sum_{j=1}^{m} timetable_{dij} \times play_{kj}$$

$$\forall d\ in\ \{1, \dots, q\}, k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\}$$

.....(44)

ข้อจำกัด (45) ถึง (49) แสดงข้อกำหนดในการซ้อม หากเริ่มซ้อมเพลงใดแล้วต้องทำการซ้อมจนจบเพลง ไม่มีการแบ่งเพลงออกเป็นหลายส่วน

$$timestart_{dij} \leq timestart_{d(i+1)j} \quad \forall d\ in\ \{1, \dots, q\}, i\ in\ \{1, \dots, n-1\}, j\ in\ \{1, \dots m\}$$

.....(45)

$$timeend_{dij} \geq timeend_{d(i+1)j} \quad \forall d\ in\ \{1, \dots, q\}, i\ in\ \{1, \dots, n-1\}, j\ in\ \{1, \dots m\}$$

.....(46)

$$timetable_{dij} \geq timestart_{dij} + timeend_{dij} - 1$$

$$\forall d\ in\ \{1, \dots, q\}, i\ in\ \{1, \dots, n\}, j\ in\ \{1, \dots m\}$$

.....(47)

$$timestart_{dij} \geq timetable_{dij}$$

$$\forall d\ in\ \{1, \dots, q\}, i\ in\ \{1, \dots, n\}, j\ in\ \{1, \dots m\}$$

.....(48)

$$timeend_{dij} \geq timetable_{dij}$$

$$\forall d\ in\ \{1, \dots, q\}, i\ in\ \{1, \dots, n\}, j\ in\ \{1, \dots m\}$$

.....(49)

เช่น หากเพลงเพลงหนึ่งเริ่มซ้อมตั้งแต่ช่วงเวลา (slot) ที่ 4 จนถึงช่วงเวลาเวลาที่ 6 ค่าของ $timestart_{dij}$, $timeend_{dij}$ และ $timetable_{dij}$ จะมีค่าดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างสำหรับตัวแปร $timestart_{dij}$, $timeend_{dij}$ และ $timetable_{dij}$

slot	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$timestart$	0	0	0	1	1	1	1	1	1
$timeend$	1	1	1	1	1	1	0	0	0
$timetable$	0	0	0	1	1	1	0	0	0

ข้อจำกัด (50) แสดงการเข้าร่วมซ้อมของนักดนตรีแต่ละคน ในแต่ละครั้งที่ซ้อม

$$\sum_{i=1}^{n} replay_{dki} \leq stay_{dk} \times M \qquad \forall d\ in\ \{1,\dots,q\}, k\ in\ \{1,\dots,p\} \qquad \text{.....(50)}$$

ข้อจำกัด (51) ถึง (56) แสดงขอบเขตของตัวแปรในแบบจำลองส่วนที่ 1 แสดงขอบเขตของตัวแปรในแบบจำลองส่วนที่ 1 ซึ่งเป็นตัวแปรฐานสอง (binary variables)

$$y_{dj} = \{0,1\} \qquad \forall d\ in\ \{1,\dots,q\}, j\ in\ \{1,\dots,m\} \qquad \text{.....(51)}$$

$$replay_{dki} = \{0,1\} \qquad \forall d\ in\ \{1,\dots,q\}, k\ in\ \{1,\dots p\}, i\ in\ \{1,\dots,n\} \qquad \text{.....(52)}$$

$$timestart_{dij} = \{0,1\} \qquad \forall d\ in\ \{1,\dots,q\}, i\ in\ \{1,\dots,n\},\ j\ in\ \{1,\dots,m\} \qquad \text{.....(53)}$$

$$timeend_{dij} = \{0,1\} \qquad \forall d\ in\ \{1,\dots,q\}, i\ in\ \{1,\dots,n\},\ j\ in\ \{1,\dots,m\} \qquad \text{.....(54)}$$

$$timetable_{dij} = \{0,1\} \qquad \forall d\ in\ \{1,\dots,q\}, i\ in\ \{1,\dots,n\},\ j\ in\ \{1,\dots,m\} \qquad \text{.....(55)}$$

$$stay_{dk} = \{0,1\} \qquad \forall d\ in\ \{1,\dots,q\}, k\ in\ \{1,\dots p\} \qquad \text{.....(56)}$$

ข้อจำกัด (57) แสดงขอบเขตตัวแปรในแบบจำลองส่วนที่ 1 มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

$$z1 \geq 0 \qquad \text{.....(57)}$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนที่ 2

หลังจากหาคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนที่ 1 มาแล้วมาแล้วจะนำจำนวนวันที่น้อยที่สุดจากสมการวัตถุประสงค์ (40) มาเป็นข้อจำกัดในแบบจำลองคณิตศาสตร์ส่วนที่ 2 ดังข้อจำกัดที่ (65) เพื่อหาคำตอบในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ส่วนที่ 2 ต่อไป โดยเปลี่ยนสมการวัตถุประสงค์เป็นการหาเวลาทั้งหมดที่นักดนตรีอยู่ในสถานที่ซ้อมโดยที่ไม่ได้ทำการซ้อม

สมการ (58) สมการวัตถุประสงค์สำหรับการหาคำตอบด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ในส่วนที่ 2 สำหรับหาเวลาทั้งหมดที่นักดนตรีอยู่ในสถานที่ซ้อมโดยที่ไม่ได้ทำการซ้อม

Minimize $$z2 = \sum_{d=1}^{q} \sum_{k=1}^{p} \sum_{i=1}^{n} w_{dki}$$

.....(58)

ในส่วนของฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraint Function) นั้นแบบจำลองคณิตศาสตร์ส่วนที่ 2 ยังคงมีข้อจำกัดที่ปรากฏในแบบจำลองส่วนที่ 1 ทุกฟังก์ชัน และเพิ่มเติมข้อจำกัด จำนวนวันโดยรวมที่นักดนตรีเข้าร่วมการซ้อมซึ่งได้จากการหาคำตอบด้วยแบบจำลองส่วนที่ 1 ด้วย

ข้อจำกัด (59) ถึง (61) แสดงสถานะนักดนตรีอยู่ในสถานที่ซ้อมหลังจากมาถึงแล้วและยังไม่กลับ

$$r_{dki} \geq a_{dki} + l_{dki} - 1 \qquad \forall d \; in \; \{1, \dots, q\}, k \; in \; \{1, \dots p\}, i \; in \; \{1, \dots, n\}$$

.....(59)

$$a_{dki} \leq a_{dk(i+1)} \qquad \forall d\ in\ \{1,\dots,q\}, k\ in\ \{1,\dots p\}, i\ in\ \{1,\dots,n-1\}$$
.....(60)

$$l_{dki} \geq l_{dk(i+1)} \qquad \forall d\ in\ \{1,\dots,q\}, k\ in\ \{1,\dots p\}, i\ in\ \{1,\dots,n-1\}$$
.....(61)

ข้อจำกัด (62) และ (63) แสดงข้อกำหนดให้นักดนตรีต้องอยู่ในสถานที่ซ้อม ขณะที่มีซ้อมเพลงที่ตนเข้าร่วมการซ้อม

$$a_{dki} \geq replay_{dki} \qquad \forall d\ in\ \{1,\dots,q\}, k\ in\ \{1,\dots p\}, i\ in\ \{1,\dots,n\}$$
.....(62)

$$l_{dki} \geq replay_{dki} \qquad \forall d\ in\ \{1,\dots,q\}, k\ in\ \{1,\dots p\}, i\ in\ \{1,\dots,n\}$$
.....(63)

ข้อจำกัด (64) แสดงสถานะของนักดนตรีที่ต้องทำการรอ หากว่าอยู่ในสถานที่ซ้อม ขณะที่ทำการซ้อมเพลงที่ตนไม่ได้เข้าร่วม

$$r_{dki} - w_{dki} \leq replay_{dki} \qquad \forall d\ in\ \{1,\dots,q\}, k\ in\ \{1,\dots p\}, i\ in\ \{1,\dots,n\}$$
.....(64)

ข้อจำกัด (65) แสดงข้อกำหนดจำนวนวันโดยรวมที่นักดนตรีเข้าร่วมการซ้อม

$$\sum_{d=1}^{q}\sum_{k=1}^{p} stay_{dk} \leq z1$$ .....(65)

ข้อจำกัด (66) ถึง (69) แสดงขอบเขตของตัวแปรในแบบจำลองส่วนที่ 2 ซึ่งเป็นตัวแปรฐานสอง (binary variables)

$$a_{dki} = \{0,1\} \qquad \forall d\ in\ \{1,\dots,q\}, k\ in\ \{1,\dots p\}, i\ in\ \{1,\dots,n\}$$
.....(66)

$l_{dki} = \{0,1\}$ $\forall d\ in\ \{1,\dots,q\}, k\ in\ \{1,\dots p\}, i\ in\ \{1,\dots,n\}$ .....(67)

$r_{dki} = \{0,1\}$ $\forall d\ in\ \{1,\dots,q\}, k\ in\ \{1,\dots p\}, i\ in\ \{1,\dots,n\}$ .....(68)

$w_{dki} = \{0,1\}$ $\forall d\ in\ \{1,\dots,q\}, k\ in\ \{1,\dots p\}, i\ in\ \{1,\dots,n\}$ .....(69)

ข้อจำกัด (70) แสดงขอบเขตตัวแปรในแบบจำลองส่วนที่ 2 มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

$z2 \geq 0$ .....(70)

4.3 วิธีการที่นำเสนอ

การแก้ปัญหาการจัดตารางการซ้อมดนตรีซึ่งทำการศึกษาในกรณีที่เพลงมีความยาวแตกต่างกันด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น การแก้ปัญหาทั้งสองส่วนด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้เวลามากและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่ขนาดปัญหาใหญ่ขึ้นเนื่องจากจำนวนเพลงเพิ่มขึ้น รวมทั้งใช้เวลาในการหาคำตอบมากกว่าปัญหาที่ทุกเพลงมีความยาวเท่ากัน

เพื่อลดเวลาในการแก้ปัญหาลงจึงสร้างวิธีการทางฮิวริสติกส์สำหรับแก้ปัญหาในส่วนแรกซึ่งเป็นการจัดสรรเพลงสำหรับการซ้อมในแต่ละวันเพื่อให้มีจำนวนวันโดยรวมที่นักดนตรีแต่ละคนต้องมาสถานที่ซ้อมน้อยที่สุด และนอกจากการแก้ปัญหาด้วยวิธีการทางฮิวริสติกส์นี้จะใช้เวลาน้อยกว่าการแก้ปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วยังให้ผลคำตอบได้หลายคำตอบ ทำให้สามารถลดเวลาในการแก้ปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแก้ปัญหาในส่วนที่สองลงได้ เนื่องจากการแก้ปัญหาในส่วนที่สองโดยอาศัยผลคำตอบจากวิธีการทางฮิวริสติกส์นี้สามารถแก้ปัญหาโดยแยกปัญหาเดิมซึ่งมีการซ้อมหลายวันออกเป็นปัญหาละ 1 วันซึ่งมีขนาดเล็กกว่าปัญหาเดิม ทำให้ใช้เวลาในการแก้ปัญหาน้อยลงมาก

4.3.1 วิธีการทางฮิวริสติกส์สำหรับจัดเพลงลงวันซ้อม

วิธีการทางฮิวริสติกส์ที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อจัดสรรเพลงสำหรับการซ้อมในแต่ละวันนี้มีพื้นฐานมาจากแนวคิดในการออกแบบการผลิตแบบเซลล์ แนวคิดในการพัฒนาวิธีการฮิวริสติกส์นี้ ประกอบด้วย 3 ประเด็นหลักเช่นเดียวกับปัญหาที่ทุกเพลงมีความยาวเท่ากัน ได้แก่ประเด็นที่หนึ่งคือการมุ่งความสนใจไปที่เพลงที่นักดนตรีจำนวนมาก “ไม่มี” ส่วนเกี่ยวข้อง หรือ มุ่งความสนใจไปที่เพลงที่มีนักดนตรีร่วมบรรเลงน้อยนั่นเอง ซึ่งทำให้เกิดการสลับค่าในตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพลงและนักดนตรี (bit flip) จากเดิม 1 ในตารางแสดงว่า นักดนตรีจะต้องเล่นเพลงนั้น และ 0 แสดงว่านักดนตรีไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับเพลงนั้น หลังจากสลับค่าแล้วเลข 1 แสดงว่านักดนตรีไม่มีส่วนร่วมในเพลงนั้น และ 0 แสดงว่านักดนตรีจะต้องเล่นเพลงนั้น จากตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพลงและนักดนตรีแสดงในตารางที่ 4.1 สามารถทำการสลับค่าได้ผลตัง ตารางหลังการสลับค่าแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตัวอย่างตารางหลังการสลับค่า

piece	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
player 1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1
player 2	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0
player 3	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
player 4	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1
player 5	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
player 6	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0
player 7	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1
player 8	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1
player 9	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0
player 10	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1

ประเด็นที่สองคือการให้ความสนใจเฉพาะนักดนตรีที่มีโอกาสจะไม่เข้าการซ้อมอย่างน้อย 1 วัน เช่น สมมติให้การซ้อมออกเป็น 2 วัน นั่นคือจากภาพที่ 4.1 ความยาวเพลงทุกเพลงรวมกันเท่ากับ 38 หน่วย นั่นคือแบ่งออกเป็น 19 หน่วย สำหรับการซ้อม 1 วัน เนื่องจากนักดนตรีคนที่ 3 ไม่ต้องเข้าร่วมการซ้อมในเพลงที่ 2, 4, 8, 10 และ 11 ซึ่งมีความยาวรวมเท่ากับ 4+4+3+4+4 เท่ากับ19 หน่วย ดังนั้นจึงมีโอกาสที่จะจัดสรรเพลงเพื่อให้นักดนตรีคนที่ 3 มีวันที่ไม่ต้องเข้าร่วมการซ้อมได้ 1 วัน ในทางตรงข้ามหากพิจารณานักดนตรีคนที่ 1 ซึ่งมีเพลงซึ่งไม่ต้องเข้าร่วมได้แก่ เพลงที่ 4, 8, 11 และ 12 ซึ่งมีความยาวรวมเท่ากับ 4+4+3+4 เท่ากับ 15 หน่วย ดังนั้นไม่ว่าจะจัดตารางอย่างไร นักดนตรีคนที่ 1 ก็จำเป็นต้องเข้าร่วมการซ้อมทั้งสองวัน จากแนวคิดดังกล่าว นักดนตรีซึ่งมีโอกาสจะไม่เข้าร่วมการซ้อมอย่างน้อย 1 วัน จะกำหนดให้มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 1 และนักดนตรีที่จำเป็นต้องเข้าร่วมการซ้อมในวันซ้อมทุกวันที่ยังไม่ได้รับการจัดสรรเพลงจะกำหนดให้มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 0 การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์นี้เป็นไปเพื่อลดการเบี่ยงเบนความสนใจจากนักดนตรีที่ต้องเข้าร่วมการซ้อมอยู่แล้ว เนื่องจากการแก้ปัญหาในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนวันที่นักดนตรีเข้าร่วมการซ้อม ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องพิจารณานักดนตรีที่ไม่มีโอกาสจะไม่เข้าซ้อม

ประเด็นสุดท้าย คือการจัดสรรเพลงที่มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกันไว้ด้วยกัน นั่นคือ พยายามจัดให้เพลงที่นักดนตรีกลุ่มเดียวกันไม่ได้ร่วมบรรเลงไว้ด้วยกัน จากแนวคิดนี้จึงมีการคำนวณหาความใกล้ชิด(closeness)ระหว่างเพลงเป็นคู่ๆ ทั้งนี้ความใกล้ชิดนี้หาได้จากผลรวมของผลคูณระหว่างสมาชิกแต่ละตัวของเพลงคู่ที่สนใจในตารางหลังการสลับค่าคูณด้วยสัมประสิทธิ์ของนักดนตรีแต่ละคน เช่นเดียวกับปัญหาที่ทุกเพลงมีความยาวเท่ากัน ตารางแสดงค่าความใกล้ชิดแสดงในตารางที่ 4.4 หลังจากคำนวณค่าความใกล้ชิดแล้วเพลงต่างๆจะได้รับการจัดสรรตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างตารางแสดงค่าความใกล้ชิด

piece	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	sum closeness
1		1	1	2	1	1	2	3	0	2	3	2	18
2			0	2	1	1	1	2	0	2	2	0	12
3				0	0	0	0	1	0	1	1	1	5
4					1	1	2	3	0	2	3	1	17
5						1	1	1	0	1	1	0	8
6							1	1	0	1	1	0	8
7								2	0	1	2	1	13
8									0	3	4	2	22
9										0	0	0	0
10											3	1	17
11												2	22
12													10

ก่อนเริ่มจัดตารางซ้อมดนตรีจะทำการหาความเป็นไปได้ในการจัดตารางก่อนโดยใช้วิธีการฮิวริสติกส์เพื่อหาเวลาปิดงานที่สั้นที่สุดสำหรับปัญหาเครื่องจักรขนานเหมือนกันทุกประการ (Baker, 1974) โดยจัดเรียงเพลงจากเพลงที่ยาวที่สุดไปหาเพลงที่สั้นที่สุด จากนั้นจัดเพลงลงในตารางซ้อมโดยเริ่มจากเพลงที่มีความยาวมากที่สุดลงในตารางก่อน แล้วจัดเพลงในลำดับต่อมาลงในวันซ้อมที่มีเวลาในการซ้อมเหลือมากที่สุด ทำเช่นนี้เรื่อยไปจนจัดเพลงลงในตารางซ้อมครบทุกเพลง หากมีวันซ้อมที่ความยาวเพลงโดยรวมมากเกินกว่าเวลาที่อนุญาตให้ทำการซ้อม แสดงว่าตัวอย่างปัญหานั้นไม่สามารถหาคำตอบได้

หลังจากหาความเป็นไปได้ในการจัดตารางแล้ว จะเริ่มทำการจัดตารางโดยทำการคำนวณความใกล้ชิดระหว่างเพลงก่อน แล้วจัดเรียงเพลงที่มีความใกล้ชิดสูงที่สุดและอยู่ในลำดับแรกสุดลงตารางก่อนโดยเริ่มจากวันแรก จากนั้นจัดเพลงทีมีความใกล้ชิดกับเพลงที่จัดลงตาราง

แล้วสูงที่สุดและอยู่ในลำดับแรกสุดเป็นเพลงต่อไปจนกระทั่งเมื่อจัดเพลงลงในตารางซ้อมของวัน ดังกล่าวแล้วความยาวเพลงรวมของวันนั้นเท่ากับหรือมากกว่าเวลาที่อนุญาตให้ทำการซ้อมการจัดตารางสำหรับวันนั้นจะสิ้นสุด และเริ่มจัดตารางสำหรับการซ้อมในวันถัดไปต่อไป ทั้งนี้หลังจากจัดเพลงใดเพลงหนึ่งลงในตารางแล้วจะต้องทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของนักดนตรีและคำนวณค่าความใกล้ชิดระหว่างเพลงใหม่ทุกครั้งหากนักดนตรีคนใดมีส่วนร่วมบรรเลงในเพลงที่จัดลงตารางในวันนั้นแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์ของนักดนตรีคนนั้นจะมีค่าเท่ากับ 0 จนกว่าการจัดตารางสำหรับวันนั้นจะสิ้นสุดลง

เมื่อจัดเพลงลงตารางในวันแรกครบแล้วจะย้ายไปจัดตารางสำหรับวันต่อไปโดยคำนวณค่าความใกล้ชิดระหว่างเพลงอีกครั้งโดยคำนวณเฉพาะความใกล้ชิดระหว่างเพลงที่ยังไม่ได้รับการจัดตารางและเลือกเพลงที่มีค่าความใกล้ชิดเทียบกับเพลงที่เหลืออยู่สูงที่สุดและอยู่ในลำดับแรกสุดเป็นเพลงแรก และทำตามขั้นตอนเดิมจนเพลงทั้งหมดถูกจัดลงตาราง

เพื่อให้ได้วิธีการจัดเพลงลงในตารางการซ้อมที่แตกต่างกัน (alternative solution) ขั้นตอนต่อมาจะทำการเลือกเพลงโดยการสุ่มลงในตารางก่อน จากนั้นจึงทำการจัดตารางตามขั้นตอนจนได้ตารางซ้อมที่สมบูรณ์ ทำซ้ำขั้นตอนการสุ่มเพลงนี้จนกระทั่งครบรอบในการสุ่มที่กำหนดไว้

ในกรณีที่จัดเพลงลงในตารางซ้อมแล้วความยาวเพลงรวมมากกว่า 19 หน่วย เช่น หากจัดเพลงในการซ้อมวันแรกได้เพลงที่ 2, 4, 7, 10 และ 11 ตามลำดับและการซ้อมวันที่สองได้เพลงที่ 1, 3, 5, 6, 8, 9 และ 12 ตามลำดับซึ่งเพลงที่ 2, 4, 7 10 และ 11 นั้นมีความยาวเพลงละ 4 หน่วย จึงทำให้ความยาวเพลงทั้งหมดเท่ากับ 20 หน่วย ซึ่งมากกว่าระยะเวลาที่อนุญาตให้ทำการซ้อม จึงต้องมีการสลับเพลงระหว่างวันซ้อมที่ระยะเวลาที่ต้องการในการซ้อมยาวเกินกว่าระยะเวลาที่กำหนดกับวันที่มีระยะเวลาที่ต้องการในการซ้อมสั้นกว่ากำหนด โดยการตัดสินใจว่าเพลงใดที่ต้องเปลี่ยนออกจากวันที่ระยะเวลาการซ้อมเกินกำหนด ทำได้ด้วยการคำนวณค่าความใกล้ชิดระหว่างเพลงอื่นที่เหลือในวันดังกล่าวกับทุกเพลงในวันที่ระยะเวลาการซ้อมสั้นกว่ากำหนด โดยเริ่มจากเพลงที่ได้รับการจัดลงในตารางเป็นลำดับสุดท้าย เช่น ตารางการซ้อมของวันที่ระยะเวลาการซ้อมเกินกำหนดได้แก่เพลงที่ 2, 4, 7, 10 และ 11 ซึ่งเพลงที่ 11 เป็นเพลงลำดับสุดท้ายที่ได้รับการจัดลงในตารางการซ้อม จะเริ่มจากการหาค่าความใกล้ชิดระหว่างเพลงที่ 2, 4, 7 และ10 กับเพลงในวันที่ระยะเวลาซ้อมสั้นกว่ากำหนดได้แก่เพลงที่ 1, 3, 5, 6, 8, 9 และ 12 และได้ค่าความใกล้ชิดดังตารางที่ 4.5 ซึ่งเพลงที่มีค่าความใกล้ชิดสูงที่สุดได้แก่เพลงที่ 8 และเป็นเพลงที่มีความยาวน้อยกว่าเพลงที่ 11 ทำการบันทึกค่าไว้ จากนั้นหาค่าความใกล้ชิดในกรณีที่เปลี่ยนเพลงอื่นๆออก จะได้ค่าความใกล้ชิดดังตารางที่ 4.6 ค่าความใกล้ชิดสูงที่สุดได้แก่สลับเพลงที่ 7 กับเพลงที่ 8 และสลับ

เพลงที่ 2 กับเพลงที่ 8 จึงเลือกสลับเพลงที่ 7 กับเพลงที่ 8 เนื่องจากเพลงที่ 7 ได้รับการจัดลงตารางการซ้อมภายหลังเพลงที่ 2

ตารางที่ 4.5 ค่าความใกล้ชิดในกรณีที่เปลี่ยนเพลงที่ 11 ออกจากวันซ้อม

		piece											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	sum closeness
piece	1		1		2			2			2			7
	3		0		0			0			1			1
	5		1		1			1			1			4
	6		1		1			1			1			4
	8		2		3			2			3			10
	9		0		0			0			0			0
	12		0		1			1			1			3

ตารางที่ 4.6 ค่าความใกล้ชิดสำหรับพิจารณาการสลับเพลงระหว่างวันซ้อม

Leaving Piece	Entering Pieces						
	1	3	5	6	8	9	12
2	9	2	4	4	12	0	5
4	8	2	4	4	11	0	4
7	8	2	4	4	12	0	4
10	8	1	4	4	11	0	4
11	7	1	4	4	10	0	3
duration	4	2	2	1	3	2	4

4.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับจัดลำดับเพลงภายในการซ้อมแต่ละวัน

เมื่อทำการจัดสรรเพลงสำหรับการซ้อมแต่ละวันเสร็จสิ้นแล้ว จะนำคำตอบที่ได้ทั้งมาจัดลำดับเพลงในแต่ละวันเพื่อหาลำดับเพลงที่ทำให้นักดนตรีต้องใช้ในการรอซ้อมขณะที่อยู่ในสถานที่ซ้อมแล้วน้อยที่สุด โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแก้ปัญหาในส่วนที่สองภายหลังหาคำตอบด้วยวิธีการฮิวริสติกส์มีลักษณะคล้ายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้กล่าวถึงได้ตอนต้น แต่มีการปรับลดสมการข้อจำกัดบางสมการลง และตัดทอนมิติของจำนวนวันออกดังต่อไปนี้

ค่าดัชนี (Index)

i = 1, . . ., n n = จำนวนช่วงเวลา (slot) ที่ทำการซ้อม

j = 1, . . ., m m = จำนวนเพลงที่ต้องทำการซ้อม

k = 1, . . .,p p = จำนวนนักดนตรีทั้งหมด

ค่าพารามิเตอร์ (Parameter)

play_{kj} = 1 ถ้านักดนตรี k ต้องเล่นเพลงที่ j

= 0 ถ้านักดนตรี k ไม่ต้องเล่นเพลงที่ j

dura_{j} = ความยาวของเพลง j (ช่วงเวลา)

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable)

a_{ki} = 1 ถ้านักดนตรี k มาถึงในช่วงเวลา (slot) ที่ i

= 0 ถ้านักดนตรี k ยังมาไม่ถึงสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i

l_{ki} = 1 ถ้านักดนตรี k ยังไม่ออกจากสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i

= 0 ถ้านักดนตรี k ออกจากสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i

r_{ki} = 1 ถ้านักดนตรี k อยู่ในสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i

= 0 ถ้านักดนตรี k ไม่อยู่ในสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i

w_{ki} = 1 ถ้านักดนตรี k อยู่ในสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i โดยไม่ร่วมการซ้อม

= 0 ถ้านักดนตรี k อยู่ในสถานที่ซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i และเข้าร่วมการซ้อม

$replay_{ki}$ = 1 ถ้านักดนตรี k ต้องซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i

= 0 ถ้านักดนตรี k ไม่ต้องซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i

$timestart_{ij}$ = 1 ถ้าเพลงที่ j มีการเริ่มซ้อมแล้วเมื่อถึงช่วงเวลา (slot) ที่ i

= 0 ถ้าเพลงที่ j ยังไม่มีการเริ่มซ้อมเมื่อถึงช่วงเวลา (slot) ที่ i

$timeend_{ij}$ = 1 ถ้าเพลงที่ j ยังไม่สิ้นสุดซ้อมเมื่อถึงช่วงเวลา (slot) ที่ i

= 0 ถ้าเพลงที่ j สิ้นสุดการซ้อมแล้วเมื่อถึงช่วงเวลา (slot) ที่ i

$timetable_{ij}$ = 1 ถ้าเพลงที่ j ทำการซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i

= 0 ถ้าเพลงที่ j ไม่มีซ้อมในช่วงเวลา (slot) ที่ i

z = เวลาทั้งหมดที่นักดนตรีอยู่ในสถานที่ซ้อมโดยที่ไม่ได้ทำการซ้อม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สมการ (71) สมการวัตถุประสงค์สำหรับการหาคำตอบในส่วนที่ 1 สำหรับหาเวลาทั้งหมดที่นักดนตรีอยู่ในสถานที่ซ้อมโดยที่ไม่ได้ทำการซ้อม

สมการวัตถุประสงค์ (Objective Function)

Minimize $z = \sum_{k=1}^{p} \sum_{i=1}^{n} w_{ki}$ .....(71)

ฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraint Function)

ข้อจำกัด (72) และ (73) แสดงการซ้อมในแต่ละเพลงต้องไม่มีการซ้อนทับกันภายในช่วงเวลาเดียวกัน และเวลารวมในการซ้อมทั้งหมดเท่ากับเวลาที่ต้องการในการซ้อม

$$\sum_{i=1}^{n} timetable_{ij} = dura_j \qquad \forall j\ in\ \{1, \dots, m\} \qquad \text{.....(72)}$$

$$\sum_{j=1}^{m} timetable_{ij} \leq 1 \qquad i\ in\ \{1, \dots, n\} \qquad \text{.....(73)}$$

ข้อจำกัด (74) แสดงการแจกแจงข้อกำหนดในการซ้อมในแต่ละช่วงเวลา (slot) สำหรับนักดนตรีแต่ละคน

$$replay_{ki} = \sum_{j=1}^{m} timetable_{ij} \times play_{kj}$$

$$k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\}$$

.....(74)

ข้อจำกัด (75) ถึง (79) แสดงข้อกำหนดในการซ้อม หากเริ่มซ้อมเพลงใดแล้วต้องทำการซ้อมจนจบเพลง ไม่มีการแบ่งเพลงออกเป็นหลายส่วน

$$timestart_{ij} \leq timestart_{(i+1)j} \qquad i\ in\ \{1, \dots, n-1\}, j\ in\ \{1, \dots m\}$$

.....(75)

$$timeend_{ij} \geq timeend_{(i+1)j} \qquad i\ in\ \{1, \dots, n-1\}, j\ in\ \{1, \dots m\}$$

.....(76)

$$timetable_{ij} \geq timestart_{ij} + timeend_{ij} - 1$$

$$i\ in\ \{1, \dots, n\}, j\ in\ \{1, \dots m\}$$

.....(77)

$$timestart_{ij} \geq timetable_{ij} \qquad i\ in\ \{1, \dots, n\}, j\ in\ \{1, \dots m\}$$

.....(78)

$$timeend_{ij} \geq timetable_{ij} \qquad i\ in\ \{1, \dots, n\}, j\ in\ \{1, \dots m\}$$

.....(79)

ข้อจำกัด (80) ถึง (82) แสดงสถานะนักดนตรีอยู่ในสถานที่ซ้อมหลังจากมาถึงแล้วและยังไม่กลับ

$$r_{ki} \geq a_{ki} + l_{ki} - 1 \qquad k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\}$$

.....(80)

$$a_{ki} \leq a_{k(i+1)} \qquad k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n-1\}$$

.....(81)

$$l_{ki} \geq l_{k(i+1)} \qquad k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n-1\}$$

.....(82)

ข้อจำกัด (83) และ (84) แสดงข้อกำหนดให้นักดนตรีต้องอยู่ในสถานที่ซ้อม ขณะที่มีซ้อมเพลงที่ตนเข้าร่วมการซ้อม

$$a_{ki} \geq replay_{ki} \qquad k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\}$$

.....(83)

$$l_{ki} \geq replay_{ki} \qquad k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\}$$

.....(84)

ข้อจำกัด (85) แสดงสถานะของนักดนตรีที่ต้องทำการรอ หากว่าอยู่ในสถานที่ซ้อม ขณะที่ทำการซ้อมเพลงที่ตนไม่ได้เข้าร่วม

$$r_{ki} - w_{ki} \leq replay_{ki} \qquad k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\} \qquad \text{.....(85)}$$

ข้อจำกัด (86) ถึง (93) แสดงขอบเขตของตัวแปรในแบบจำลองซึ่งเป็นตัวแปรฐานสอง (binary variables)

$$replay_{ki} = \{0, 1\} \qquad \forall k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\} \qquad \text{.....(86)}$$

$$timestart_{ij} = \{0, 1\} \qquad \forall i\ in\ \{1, \dots, n\},\ j\ in\ \{1, \dots, m\} \qquad \text{.....(87)}$$

$$timeend_{ij} = \{0, 1\} \qquad \forall i\ in\ \{1, \dots, n\},\ j\ in\ \{1, \dots, m\} \qquad \text{.....(88)}$$

$$timetable_{ij} = \{0, 1\} \qquad \forall i\ in\ \{1, \dots, n\},\ j\ in\ \{1, \dots, m\} \qquad \text{.....(89)}$$

$$a_{ki} = \{0, 1\} \qquad \forall k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\} \qquad \text{.....(90)}$$

$$l_{ki} = \{0, 1\} \qquad \forall k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\} \qquad \text{.....(91)}$$

$$r_{ki} = \{0, 1\} \qquad \forall k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\} \qquad \text{.....(92)}$$

$$w_{ki} = \{0, 1\} \qquad \forall k\ in\ \{1, \dots p\}, i\ in\ \{1, \dots, n\} \qquad \text{.....(93)}$$

ข้อจำกัด (94) แสดงขอบเขตตัวแปรในแบบจำลองซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

$$z \geq 0 \qquad \text{.....(94)}$$

4.4 ผลการวิจัย

หัวข้อนี้แสดงผลการวิจัยโดยเปรียบเทียบระหว่างผลการหาคำตอบซึ่งหาโดยวิธีการที่นำเสนอและผลการหาคำตอบซึ่งหาโดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ ผลการวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งได้แก่ผลการหาคำตอบสำหรับปัญหาทั้งสองส่วนด้วยวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หาคำตอบของปัญหาส่วนที่สองด้วยการจัดเรียงเพลงทุกเพลงที่ใช้ในการแสดงในคราวเดียวกัน โดยมีฟังก์ชันข้อจำกัดสำหรับจำนวนวันโดยรวมที่นักดนตรีเข้าร่วมการซ้อม ผลวิจัยส่วนที่สองได้แก่ผลการหาคำตอบสำหรับปัญหาส่วนที่สองด้วยวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับการหาคำตอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการแบ่งคำตอบจากการจัดสรรเพลงสำหรับการซ้อมแต่ละวันซึ่งคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาส่วนแรกออกเป็นปัญหาขนาดเล็กปัญหาละ 1 วันหลายปัญหา แล้วจัดลำดับเพลงภายในการซ้อมแต่ละวันด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4.4.1 ผลการหาคำตอบสำหรับปัญหาทั้งสองส่วนด้วยวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

หัวข้อนี้แสดงผลการวิจัยโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าวัตถุประสงค์และเวลาในการหาคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการฮิวริสติกส์ โดยปัญหาตัวอย่างที่ทำการวิจัยสร้างขึ้นโดยการสุ่ม แบ่งออกเป็น 7 ขนาดโดยแบ่งเป็นปัญหาที่มีจำนวนวันที่ทำการซ้อมเท่ากับ 2 วัน แบ่งเป็นปัญหาที่จำนวนเพลงเท่ากับ 10, 12 และ 14 เพลง และปัญหาที่มีจำนวนวันที่ทำการซ้อมเท่ากับ 3 วัน แบ่งเป็นปัญหาที่จำนวนเพลงเท่ากับ 10, 12, 14 และ 16 เพลง โดยปัญหาแต่ละขนาดมีจำนวนนักดนตรีเท่ากับ 5 คน และประกอบด้วยตัวอย่างซึ่งทำการสุ่มขนาดละ 10 ตัวอย่าง ผลการวิจัยสำหรับปัญหาส่วนแรกแสดงในตาราง 4.7 พบว่าวิธีการฮิวริสติกส์ให้ค่าวัตถุประสงค์เท่ากับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งหมดทุกตัวอย่าง โดยวิธีการฮิวริสติกส์ใช้เวลาในการหาคำตอบต่ำกว่าสำหรับทุกตัวอย่างปัญหา สำหรับผลการวิจัยสำหรับการแก้ปัญหาทั้งสองส่วน พบว่าวิธีการฮิวริสติกส์ใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยกว่าการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาคำตอบในทุกกรณี ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และเนื่องจากจำกัดเวลาในการหาคำตอบไว้ที่ 12 ชั่วโมง ทำให้มีคำตอบสำหรับปัญหาบางตัวอย่างที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังไม่พบค่าคำตอบที่ดีที่สุด ได้แก่ตัวอย่างปัญหาที่ 6 และ 9 ของปัญหาที่มีจำนวนวันซ้อมเท่ากับ 3 วันและมีจำนวนเพลงเท่ากับ 14 เพลง และ ตัวอย่างปัญหาที่ 5 และ 6 ของปัญหาที่จำนวนวันซ้อมเท่ากับ 3 วันและมีจำนวนเพลงเท่ากับ 16 เพลง ซึ่งผลการวิจัยสำหรับการแก้ปัญหาทั้งสองส่วน พบว่า

วิธีการฮิวริสติกส์สามารถให้ค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาส่วนที่สองเท่ากับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งหมดทุกตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 4.9

นอกจากปัญหาการจัดตารางการซ้อมดนตรีที่ได้แสดงผลการวิจัยแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบหาคำตอบของปัญหาส่วนแรก สำหรับปัญหาที่มีจำนวนเพลงเท่ากับ 40 เพลง นักดนตรี 20 คน และแบ่งการซ้อมออกเป็น 5 วัน พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ โดยจากการหาคำตอบโดยใช้เวลาประมาณ 3,000,000 วินาที หรือประมาณ 35 วัน ได้คำตอบที่ดีที่สุดเท่ากับ 80 ซึ่งห่างจากค่าขอบเขตล่างร้อยละ 52.05 ในขณะที่คำตอบที่ดีที่สุดจากวิธีการฮิวริสติกส์เท่ากับ 93 ซึ่งต่างจากคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร้อยละ 13.98 โดยใช้เวลาในการหาคำตอบ 22,398.02 วินาที

ตารางที่ 4.7 ผลการวิจัยโดยเปรียบเทียบระหว่างค่าวัตถุประสงค์และเวลาในการหาคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาส่วนแรก

Problem Size			Average Elapsed Time (s)			Objective Difference (%)		
No. of Piece	No. of Player	No. of Day	IP	Heuristics	Difference (%)	min	max	average
10	5	2	5.87	4.47	23.86	0.00	0.00	0.00
12	5	2	10.55	7.35	30.36	0.00	0.00	0.00
14	5	2	25.15	15.05	40.15	0.00	0.00	0.00
10	5	3	18.66	5.56	70.22	0.00	0.00	0.00
12	5	3	65.10	8.45	87.02	0.00	0.00	0.00
14	5	3	82.34	26.01	68.41	0.00	0.00	0.00
16	5	3	418.75	36.31	91.33	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 4.8 ผลการวิจัยโดยเปรียบเทียบระหว่างเวลาในการหาคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
และวิธีการที่นำเสนอสำหรับปัญหาทั้งสองส่วน

Problem Size			Average IP Elapsed Time (s)			Average Proposed Methodology Elapsed Time (s)			
No. of Piece	No. of Player	No. of Day	Stage 1	Stage 2	Total	Stage 1	Stage 2	Total	Difference (%)
10	5	2	5.87	89.75	95.62	4.47	24.34	28.81	69.87
12	5	2	10.55	1239.04	1249.59	7.35	134.03	141.38	88.69
14	5	2	25.15	2776.90	2802.05	15.05	410.11	425.16	84.83
10	5	3	18.66	265.39	284.05	5.56	109.31	114.87	59.56
12	5	3	65.10	2118.49	2183.59	8.45	44.55	53.00	97.57
14	5	3	82.34	13277.33	13359.67	26.01	194.67	220.68	98.35
16	5	3	418.75	14163.35	14582.10	36.31	507.13	543.44	96.27

ตารางที่ 4.9 ผลการวิจัยโดยเปรียบเทียบระหว่างค่าวัตถุประสงค์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
และวิธีการที่นำเสนอสำหรับปัญหาทั้งสองส่วน

Problem Size			Stage 1 Objective Difference (%)			Stage 2 Objective Difference (%)		
No. of Piece	No. of Player	No. of Day	min	max	average	min	max	average
10	5	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	5	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	5	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	5	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	5	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	5	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	5	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

4.4.2 ผลการหาคำตอบสำหรับปัญหาส่วนที่สองด้วยวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาขนาดเล็กหลายปัญหา

หัวข้อนี้แสดงผลการวิจัยโดยเปรียบเทียบระหว่างผลการหาคำตอบสำหรับปัญหาส่วนวนที่สองด้วยวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับการหาคำตอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการแบ่งคำตอบจากการจัดสรรเพลงสำหรับการซ้อมแต่ละวันซึ่งคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาส่วนแรกออกเป็นปัญหาขนาดเล็กปัญหาละ 1 วันหลายปัญหา แล้วจัดลำดับเพลงภายในการซ้อมแต่ละวันด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ปัญหาการจัดลำดับเพลงในส่วนที่สองนั้นใช้เวลาสูงมากในการหาคำตอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังที่แสดงในหัวข้อ 4.4.1 ซึ่งทำให้เกิดแนวคิดการใช้วิธีการฮิวริสติกส์ในการช่วยหาคำตอบ โดยวิธีการฮิวริสติกส์หาคำตอบในปัญหาส่วนแรกออกมาหลายๆคำตอบและแบ่งคำตอบเหล่านั้นออกเป็นปัญหาขนาดเล็กปัญหาละ 1 วันหลายๆปัญหา ทำให้แบบจำลองคณิตศาสตร์ใช้เวลาน้อยลงมากในการแก้ปัญหาขนาดเล็กเหล่านี้ แต่วิธีการนี้จะใช้ได้ผลดีต่อเมื่อกระบวนการหาคำตอบในปัญหาส่วนแรกสามารถหาคำตอบได้หลากหลายมากพอที่จะครอบคลุมคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาส่วนที่สอง จึงไม่สามารถนำคำตอบของปัญหาส่วนแรกซึ่งหาได้โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์มาทำการแบ่งออกเป็นปัญหาขนาดเล็กแล้วหาคำตอบของปัญหาขนาดเล็กเหล่านั้นได้ เนื่องจากคำตอบของปัญหาส่วนแรกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีเพียงคำตอบเดียวซึ่งอาจเป็นคำตอบที่นำไปสู่คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาส่วนที่สองหรือไม่ก็ได้

ทั้งนี้เมื่อนำผลคำตอบสำหรับปัญหาส่วนแรกที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาแบ่งออกเป็นปัญหาขนาดเล็ก ปัญหาละ 1 วันเช่นเดียวกับวิธีการที่นำเสนอแล้ว พบว่าค่าวัตถุประสงค์ที่หาได้จากวิธีดังกล่าวมีค่าเท่ากับหรือสูงกว่าค่าวัตถุประสงค์ที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ ในทุกขนาดปัญหา โดยแต่ละขนาดปัญหาประกอบด้วย 10 ปัญหาตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 4.10 ถึงตารางที่ 4.16 โดยค่าเฉลี่ยผลต่างของทุกปัญหาตัวอย่างเท่ากับร้อยละ 47.4

ตารางที่ 4.10 ผลการหาคำตอบสำหรับปัญหาส่วนที่สองด้วยวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาขนาดเล็กหลายปัญหาสำหรับปัญหาที่มี 10 เพลงผู้เล่น 5 คนและแบ่งวันซ้อมออกเป็น 2 วัน

Problem Size			Waiting Time (slots)			
No. of Piece	No. of Player	No. of Day	IP	Proposed Methodology	Difference (%)	No. of Solution
10	5	2	0	0	0.00	6
10	5	2	1	0	100.00	7
10	5	2	1	1	0.00	2
10	5	2	2	0	100.00	3
10	5	2	3	1	66.67	4
10	5	2	3	1	66.67	4
10	5	2	1	0	100.00	2
10	5	2	2	0	100.00	2
10	5	2	1	1	0.00	2
10	5	2	4	4	0.00	1
				Average	53.33	3.30

ตารางที่ 4.11 ผลการหาคำตอบสำหรับปัญหาส่วนที่สองด้วยวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาขนาดเล็กหลายปัญหาสำหรับปัญหาที่มี 12 เพลงผู้เล่น 5 คนและแบ่งวันซ้อมออกเป็น 2 วัน

Problem Size			Waiting Time (slots)			
No. of Piece	No. of Player	No. of Day	IP	Proposed Methodology	Difference (%)	No. of Solution
12	5	2	9	5	44.44	8
12	5	2	2	1	50.00	16
12	5	2	2	0	100.00	82
12	5	2	0	0	0.00	1
12	5	2	5	4	20.00	2
12	5	2	6	1	83.33	9
12	5	2	1	0	100.00	7
12	5	2	0	0	0.00	2
12	5	2	1	1	0.00	3
12	5	2	6	3	50.00	11
				Average	44.78	14.10

ตารางที่ 4.12 ผลการหาคำตอบสำหรับปัญหาส่วนที่สองด้วยวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาขนาดเล็กหลายปัญหาสำหรับปัญหาที่มี 14 เพลงผู้เล่น 5 คนและแบ่งวันซ้อมออกเป็น 2 วัน

Problem Size			Waiting Time (slots)			
No. of Piece	No. of Player	No. of Day	IP	Proposed Methodology	Difference (%)	No. of Solution
14	5	2	13	2	84.62	32
14	5	2	7	3	57.14	11
14	5	2	5	0	100.00	109
14	5	2	2	2	0.00	1
14	5	2	10	7	30.00	4
14	5	2	2	1	50.00	19
14	5	2	4	0	100.00	18
14	5	2	2	0	100.00	29
14	5	2	6	1	83.33	19
14	5	2	7	3	57.14	22
				Average	66.22	26.40

ตารางที่ 4.13 ผลการหาคำตอบสำหรับปัญหาส่วนที่สองด้วยวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาขนาดเล็กหลายปัญหาสำหรับปัญหาที่มี 10 เพลงผู้เล่น 5 คนและแบ่งวันซ้อมออกเป็น 3 วัน

Problem Size			Waiting Time (slots)			
No. of Piece	No. of Player	No. of Day	IP	Proposed Methodology	Difference (%)	No. of Solution
10	5	3	2	0	100.00	4
10	5	3	1	1	0.00	3
10	5	3	1	1	0.00	2
10	5	3	1	0	100.00	73
10	5	3	0	0	0.00	7
10	5	3	0	0	0.00	1
10	5	3	0	0	0.00	6
10	5	3	2	2	0.00	4
10	5	3	0	0	0.00	8
10	5	3	1	0	100.00	13
				Average	30.00	12.10

ตารางที่ 4.14 ผลการหาคำตอบสำหรับปัญหาส่วนที่สองด้วยวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาขนาดเล็กหลายปัญหาสำหรับปัญหาที่มี 12 เพลงผู้เล่น 5 คนและแบ่งวันซ้อมออกเป็น 3 วัน

Problem Size			Waiting Time (slots)			
No. of Piece	No. of Player	No. of Day	IP	Proposed Methodology	Difference (%)	No. of Solution
12	5	3	3	3	0.00	1
12	5	3	3	1	66.67	2
12	5	3	2	2	0.00	3
12	5	3	0	0	0.00	3
12	5	3	0	0	0.00	1
12	5	3	2	0	100.00	9
12	5	3	0	0	0.00	3
12	5	3	0	0	0.00	6
12	5	3	2	1	50.00	17
12	5	3	5	2	60.00	3
				Average	27.67	4.80

ตารางที่ 4.15 ผลการหาคำตอบสำหรับปัญหาส่วนที่สองด้วยวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาขนาดเล็กหลายปัญหาสำหรับปัญหาที่มี 14 เพลงผู้เล่น 5 คนและแบ่งวันซ้อมออกเป็น 3 วัน

Problem Size			Waiting Time (slots)			
No. of Piece	No. of Player	No. of Day	IP	Proposed Methodology	Difference (%)	No. of Solution
14	5	3	5	3	40.00	2
14	5	3	1	1	0.00	14
14	5	3	1	1	0.00	9
14	5	3	3	0	100.00	18
14	5	3	4	0	100.00	53
14	5	3	3	1	66.67	2
14	5	3	0	0	0.00	2
14	5	3	0	0	0.00	7
14	5	3	6	1	83.33	5
14	5	3	2	0	100.00	30
				Average	49.00	14.20

ตารางที่ 4.16 ผลการหาคำตอบสำหรับปัญหาส่วนที่สองด้วยวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาขนาดเล็กหลายปัญหาสำหรับปัญหาที่มี 16 เพลงผู้เล่น 5 คนและแบ่งวันซ้อมออกเป็น 3 วัน

Problem Size			Waiting Time (slots)			
No. of Piece	No. of Player	No. of Day	IP	Proposed Methodology	Difference (%)	No. of Solution
16	5	3	2	2	0.00	1
16	5	3	4	1	75.00	3
16	5	3	2	0	100.00	66
16	5	3	2	0	100.00	297
16	5	3	3	1	66.67	29
16	5	3	1	0	100.00	1
16	5	3	0	0	0.00	8
16	5	3	2	0	100.00	41
16	5	3	7	2	71.43	5
16	5	3	0	0	0.00	32
				Average	61.31	48.30

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดโดยสรุปเกี่ยวกับสภาพปัญหา วิธีการแก้ปัญหา ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการแก้ปัญหา ประโยชน์ที่ได้รับ รวมถึงปัญหาและอุปสรรคในการทำวิจัยเล่มนี้ ตลอดจนข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 สภาพปัญหา วิธีการแก้ปัญหาและข้อจำกัดของระเบียบวิธี

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการฮิวริสติกส์เพื่อช่วยในการจัดตารางซ้อมของวงดนตรีขนาดใหญ่ซึ่งแบ่งการซ้อมออกเป็นหลายวัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อจัดสรรเพลงสำหรับการซ้อมในแต่ละวันเพื่อให้มีจำนวนวันโดยรวมที่นักดนตรีแต่ละคนต้องมาสถานที่ซ้อมน้อยที่สุด และจัดลำดับเพลงเพื่อให้เวลาทั้งหมดที่นักดนตรีอยู่ในสถานที่ซ้อมโดยที่ไม่ได้ทำการซ้อมมีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากปัญหาการจัดตารางซ้อมดนตรีนี้มีลักษณะเป็นปัญหาประเภท NP-hard ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้เวลาในการหาคำตอบเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อจำนวนเพลงและจำนวนวันที่ทำการซ้อมเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการจัดลำดับเพลงในการซ้อมแต่ละวันซึ่งใช้เวลาในการหาคำตอบมากกว่าการจัดสรรเพลงอย่างมาก ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถแก้ปัญหาขนาดใหญ่ได้ จึงเกิดแนวคิดในการ แบ่งปัญหาออกเป็น 2 ส่วน โดยใช้วิธีการฮิวริสติกส์จัดสรรเพลงสำหรับการซ้อมในแต่ละวันและแบ่งปัญหาเดิมซึ่งมีการซ้อมหลายวันออกเป็นปัญหาย่อยๆปัญหาละ 1 วัน จากนั้นจึงใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จัดลำดับเพลงสำหรับปัญหาย่อยเหล่านั้น

วิธีการฮิวริสติกส์ที่นำมาช่วยหาคำตอบนี้มีพื้นฐานมาจากฮิวริสติกส์สำหรับออกแบบการผลิตแบบเซลล์ ซึ่งนอกจากจะใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วยังให้ผลคำตอบได้หลายคำตอบด้วย ทำให้การนำตารางซ้อมซึ่งจัดสรรเพลงลงวันซ้อมแต่ละวันมาจัดลำดับเพลงด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ในปัญหาส่วนที่สองมีความหลากหลายและมีโอกาสได้คำตอบที่ดีที่สุดมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้ทราบว่าวิธีการที่นำเสนอให้ผลใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด โดยงานวิจัยนี้ แบ่งปัญหาออกเป็น 2 ประเภท คือ การจัดตารางซ้อมในกรณีที่เพลงทุกเพลงมีความยาวเท่ากัน และการจัดตารางซ้อมในกรณีที่เพลงมีความยาวแตกต่างกัน สำหรับกรณีที่ทุกเพลงมีความยาวเท่ากัน

ทำการเปรียบเทียบด้วยปัญหาตัวอย่างจำนวน 80 ตัวอย่าง ในการจัดสรรเพลงสำหรับการซ้อมแต่ละวัน วิธีการที่นำเสนอสามารถให้คำตอบเท่ากับคำตอบที่หาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาตัวอย่างทั้งหมด 80 ตัวอย่าง ส่วนการจัดลำดับเพลงในการซ้อมแต่ละวัน วิธีการที่นำเสนอให้คำตอบเท่ากับคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 78 ปัญหา โดยมี 2 ปัญหาตัวอย่างที่วิธีการที่นำเสนอให้คำตอบดีกว่าคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เนื่องจากการหาคำตอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีการจำกัดเวลาการหาคำตอบไว้ที่ 2 ชั่วโมงทำให้มีปัญหาตัวอย่างจำนวน 9 ปัญหาซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังหาคำตอบที่ดีที่สุดไม่พบ และปัญหาตัวอย่างทั้งสองปัญหาที่วิธีการที่นำเสนอให้คำตอบดีกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีผลต่างของค่าวัตถุประสงค์เท่ากับร้อยละ 14.29 และ 28.57

ในกรณีที่เพลงมีความยาวแตกต่างกัน ทำการเปรียบเทียบด้วยปัญหาตัวอย่างจำนวน 70 ตัวอย่าง วิธีการที่นำเสนอสามารถให้คำตอบเท่ากับคำตอบที่หาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาตัวอย่างทั้งหมด 70 ตัวอย่างสำหรับปัญหาทั้งสองส่วน โดยในส่วนของการจัดลำดับเพลงในการซ้อมแต่ละวัน มีปัญหาตัวอย่าง 4 ปัญหาที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังไม่พบค่าคำตอบที่ดีที่สุดเนื่องจากการหาคำตอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีการจำกัดเวลาการหาคำตอบไว้ที่ 12 ชั่วโมง

นอกจากนี้ยังมีการทดสอบหาคำตอบของปัญหาส่วนแรกสำหรับปัญหาที่มีจำนวนเพลงเท่ากับ 40 เพลง นักดนตรี 20 คน และแบ่งการซ้อมออกเป็น 5 วันแพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งคำตอบที่วิธีการที่นำเสนอใช้เวลาในการคำนวณประมาณ 6 ชั่วโมงนั้น เท่ากับคำตอบซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้เวลาในการคำนวณประมาณ 22 วัน และ มีความแตกต่างจากคำตอบซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้เวลาในการคำนวณประมาณ 35 วันเพียงร้อยละ 13.98 แต่อย่างไรก็ตามคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ยังไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด

การจัดสรรเพลงสำหรับการซ้อมแต่ละวันเพื่อให้มีจำนวนวันโดยรวมที่นักดนตรีเข้าร่วมซ้อมน้อยที่สุดในปัญหาส่วนแรกของงานวิจัยนี้มีลักษณะคล้ายกับการออกแบบการผลิตแบบเซลล์ซึ่งพยายามจัดชิ้นส่วนที่ทำการผลิตและเครื่องจักรออกเป็นเซลล์การผลิต เมื่อพิจารณาขนาดของปัญหาที่ทำการทดสอบในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบการผลิตแบบเซลล์ โดยเทียบเคียงจำนวณเพลงและจำนวนนักดนตรี กับจำนวนชิ้นส่วนที่ทำการผลิตและจำนวนเครื่องจักรแล้ว พบว่าปัญหาในงานวิจัยนี้มีขนาดค่อนข้างเล็ก เนื่องจากปัญหาในงานวิจัยนี้มีขนาดตั้งแต่ $m \times n$ (จำนวนเพลง x จำนวนนักดนตรี) เท่ากับ 10x5 จนถึง 16x10 และมีปัญหาขนาด

ใหญ่ที่สุดที่ทำการทดสอบเท่ากับ 40x20 ในขณะที่ขนาดปัญหาที่ทำการทดสอบในงานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบการผลิตแบบเซลล์นั้นมีขนาดตั้งแต่ $m \times n$ (จำนวนชิ้นส่วน x เครื่องจักร) เท่ากับ 7x5 (Tariq และคณะ (2009)) จนถึง 100x40 (Boe และ Cheng (1991), Mak และคณะ (2000), Tariq และคณะ(2009)) แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้แบ่งปัญหาออกเป็นสองส่วนซึ่งปัญหาการจัดลำดับเพลงภายในการซ้อมแต่ละวันเพื่อให้นักดนตรีใช้เวลาในการรอซ้อมน้อยที่สุดในส่วนที่สองนั้นเป็นปัญหาที่ต้องใช้เวลาในการหาคำตอบมากกว่าปัญหาส่วนแรก หากเปรียบเทียบขนาดของปัญหาส่วนที่สองที่ทำการทดสอบในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยเกี่ยวกับการจัดตารางซ้อมดนตรีหรือการจัดตารางการถ่ายทำภาพยนต์แล้ว พบว่าปัญหาในงานวิจัยนี้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ เนื่องจากปัญหาในงานวิจัยเกี่ยวกับการจัดตารางซ้อมดนตรีหรือการจัดตารางการถ่ายทำภาพยนต์จะมีขนาดตั้งแต่ $m \times n$ (จำนวนเพลง x จำนวนนักดนตรี หรือ จำนวนฉาก x จำนวนนักแสดง) เท่ากับ 6x6 (Cheng และคณะ (1993)) จนถึง 28x11 (Garcia de la Banda และคณะ (2011)) เท่านั้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยการจัดตารางซ้อมสำหรับวงดนตรีขนาดใหญ่ มีดังนี้ การหาคำตอบสำหรับการจัดลำดับเพลงในปัญหาส่วนที่สอง ซึ่งผ่านการจัดสรรเพลงให้แก่การซ้อมแต่ละวันด้วยวิธีการฮิวริสติกส์และแบ่งออกเป็นปัญหาย่อยๆปัญหาละ 1 วันแล้ว หากปัญหาย่อยแต่ละปัญหานั้นมีเพลงที่ต้องจัดลำดับไม่เกิน 8 เพลงแล้ว วิธีการหาคำตอบด้วยการสลับตำแหน่ง (permutation) ซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด(full enumerate) โดยการสลับตำแหน่งของเพลงไปเรื่อยๆจนครบทุกรูปแบบ หากดำเนินการต่อจากวิธีการฮิวริสติกส์บนโปรแกรมเดียวกันจะใช้เวลาในการหาคำตอบที่รวดเร็วกว่าการหาคำตอบสำหรับปัญหาย่อยเหล่านั้นด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากการหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาดไม่เกิน 8 เพลงนี้ใช้เวลาน้อยกว่าเวลาที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้เพื่ออ่านข้อมูล แต่หากจำนวนเพลงที่ต้องจัดลำดับภายในวันซ้อมมากเกินกว่า 8 เพลงแล้ว การสลับตำแหน่งดังกล่าวจะใช้เวลาในการหาคำตอบเพิ่มขึ้นอย่างมาก การหาคำตอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความเหมาะสมมากกว่า ทั้งนี้หากเพลงที่ต้องจัดลำดับในแต่ละวันมีจำนวนเพิ่มขึ้นเกินกว่า 16 เพลงแล้วการหาคำตอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อาจใช้เวลานานหลายชั่วโมง จึงควรพัฒนาวิธีการฮิวริสติกส์สำหรับการจัดลำดับเพลงภายในวันซ้อมเพื่อให้สามารถจัดตารางซ้อมสำหรับปัญหาที่มีขนาดใหญ่มากๆได้

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ปารเมศ ชุติมา. เทคนิคการจัดตารางการดำเนินงาน. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

วิทยา สุหฤทดำรง และ ยุพา กลอนกลาง. การผลิตแบบเซลลูลาร์. กรุงเทพมหานคร : อี.ไอ. สแคร์พับลิชชิ่ง, 2549.

ภาษาอังกฤษ

Baker, K.R., Introduction to Sequencing and Scheduling, New York: John Wiley and Sons, 1974.

Boe, W.J. and Cheng, C.H. A Close Neighbour Algorithm for Designing Cellular Manufacturing Systems. Production Research 29(1991) : 2097 - 2116.

Chang, P.C., Chen, S.H. and Lin, K.L. Two-Phase Sub Population Genetic Algorithm for Parallel Machine-Scheduling Problem. Expert Systems with Applications 29(2005) : 705 - 712.

Cheng, R., Gen, M. and Tosawa, T. Minmax Earliness/Tardiness Scheduling in Identical Parallel Machine System Using Genetic Algorithms. Computer and Industrial Engineering 29(1995) : 513 - 517.

Cheng, R. and Gen, M. Parallel Machine Scheduling Problems Using Memetic Algorithm. Computers and Industrial Engineering 33(1997) : 761 - 764.

Cheng. T.C.E. A Heuristic for Common Due-date Assignment and Job Scheduling on Parallel Machines. Journal of Operational Research Society 40(1989) : 1129 – 1135.

Cheng. T.C.E., Diamond. J.E. and Lin. B.M.T. Optimal Scheduling in Film Production to Minimize Talent Hold Cost. Optimization Theory and Application 3(1993).

Cheng, T.C.E. and Chen, Z.L. Parallel-Machine Scheduling Problems with Earliness and Tardiness Penalties. Journal of Operational Research Society 45(1994) : 685 – 695.

Garcia de la Banda, M., Stuckey, P.J. and Chu, G. Solving Talent Scheduling with Dynamic Programming. Informs Journal on Computing 23(2011) : 120 – 137.

Gregory, P., Miller, A. and Prosser, P. Solving the Rehearsal Problem with Planning and with Model Checking. European conference on artificial intelligence 16(2004) : 157-171.

Jou, C.A. Genetic Algorithm with Sub-Indexed Partitioning Genes and Its Application to Production Scheduling of Parallel Machines. Computers and Industrial Engineering 48(2005) 39 - 54.

Mak, K.L., Wong, Y.S. and Wang, X.X. An Adaptive Genetic Algorithm for Manufacturing Cell Formation. Advanced Manufacturing Technology 16(2000) : 491 - 497.

McCormick, W.T., Schweitzer, P.J., White, T.W. Problem Decomposition and Data Reorganization by a Clustering Technique. Operations Research 20(1972) : 993-1009.

Min, L. and Cheng, W. A Genetic Algorithm for Minimizing the Makespan in The Case of Scheduling Identical Parallel Machines. Artificial Intelligence in Engineering 13(1999) : 399 - 403.

Min, L. and Cheng, W. Genetic Algorithm for The Optimal Common Due Date Assignment and The Optimal Scheduling Policy in Parallel Machine Earliness/Tardiness Scheduling Problems. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 22(2006) : 279 - 287.

Moon, C. and Gen, M. A Genetic Algorithm-Based Approach for Design of Independent Manufacturing Cells. International Journal of Production Economics 60-61(1999) : 421 - 426.

Sivrikaya-Serifoglu, F. and Ulusoy, G. Parallel Machine Scheduling with Earliness and Tardiness Penalties. Computer and Operations Research 26(1999) : 773 – 787.

Smith, B. Constraint Programming in Practice: Scheduling a Rehearsal. Research Report APES-67(2003).

Singh, N. Design of Cellular Manufacturing Systems : an Invited Review. European Journal of Operational Research 69 (1993) : 284-291.

Tariq, A., Hussain, I. and Ghafoor, A. A Hybrid Genetic Algorithm for Machine-Part Grouping. Computers and Industrial Engineering 56 (2009) : 347 - 356.

Tavakkoli-Moghaddam, R., Taheri, F., Bazzazi, M., Izadi, M. and Sassani, F. Design of a Genetic Algorithm for Bi-Objective Unrelated Parallel Machines Scheduling with Sequence-Dependent Setup Times and Precedence Constraints. Computers and Operations Research 36(2009) : 3224 - 3230.

Wu, X., Chu, C.X., Wang, Y. and Yan, W. A Genetic Algorithm for Cellular Manufacturing Design and Layout. European Journal of Operational Research 181(2007) : 156 – 167.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการฮิวริสติกส์

ส่วนนี้เป็นตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องและประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ

ตารางที่ ก-1 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากันชุดที่ 1

เพลง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
นักดนตรี 1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0
นักดนตรี 2	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0
นักดนตรี 3	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0
นักดนตรี 4	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0
นักดนตรี 5	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0
นักดนตรี 6	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
นักดนตรี 7	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0
นักดนตรี 8	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
นักดนตรี 9	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1
นักดนตรี 10	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1

ตารางที่ ก-2 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากันชุดที่ 2

เพลง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
นักดนตรี 1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0
นักดนตรี 2	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0
นักดนตรี 3	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1
นักดนตรี 4	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0
นักดนตรี 5	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1
นักดนตรี 6	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1
นักดนตรี 7	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1
นักดนตรี 8	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
นักดนตรี 9	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0
นักดนตรี 10	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0

ตารางที่ ก-3 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากันชุดที่ 3

เพลง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
นักดนตรี 1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0
นักดนตรี 2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
นักดนตรี 3	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0
นักดนตรี 4	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
นักดนตรี 5	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0
นักดนตรี 6	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
นักดนตรี 7	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1
นักดนตรี 8	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
นักดนตรี 9	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1
นักดนตรี 10	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1

ตารางที่ ก-4 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากันชุดที่ 4

เพลง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
นักดนตรี 1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1
นักดนตรี 2	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1
นักดนตรี 3	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1
นักดนตรี 4	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1
นักดนตรี 5	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1
นักดนตรี 6	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0
นักดนตรี 7	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
นักดนตรี 8	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
นักดนตรี 9	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0
นักดนตรี 10	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0

ตารางที่ ก-5 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากันชุดที่ 5

เพลง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
นักดนตรี 1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0
นักดนตรี 2	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0
นักดนตรี 3	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1
นักดนตรี 4	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
นักดนตรี 5	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1
นักดนตรี 6	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0
นักดนตรี 7	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1
นักดนตรี 8	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1
นักดนตรี 9	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
นักดนตรี 10	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0

ตารางที่ ก-6 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากันชุดที่ 6

เพลง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
นักดนตรี 1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1
นักดนตรี 2	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0
นักดนตรี 3	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1
นักดนตรี 4	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
นักดนตรี 5	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1
นักดนตรี 6	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
นักดนตรี 7	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
นักดนตรี 8	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0
นักดนตรี 9	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1
นักดนตรี 10	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1

ตารางที่ ก-7 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากันชุดที่ 7

เพลง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
นักดนตรี 1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1
นักดนตรี 2	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0
นักดนตรี 3	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1
นักดนตรี 4	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0
นักดนตรี 5	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1
นักดนตรี 6	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
นักดนตรี 7	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0
นักดนตรี 8	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
นักดนตรี 9	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
นักดนตรี 10	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0

ตารางที่ ก-8 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากันชุดที่ 8

เพลง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
นักดนตรี 1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1
นักดนตรี 2	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1
นักดนตรี 3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0
นักดนตรี 4	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0
นักดนตรี 5	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0
นักดนตรี 6	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1
นักดนตรี 7	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
นักดนตรี 8	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1
นักดนตรี 9	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0
นักดนตรี 10	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0

ตารางที่ ก-9 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากันชุดที่ 9

เพลง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
นักดนตรี 1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
นักดนตรี 2	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0
นักดนตรี 3	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0
นักดนตรี 4	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1
นักดนตรี 5	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1
นักดนตรี 6	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1
นักดนตรี 7	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1
นักดนตรี 8	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1
นักดนตรี 9	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1
นักดนตรี 10	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1

ตารางที่ ก-10 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากันชุดที่ 10

เพลง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
นักดนตรี 1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
นักดนตรี 2	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0
นักดนตรี 3	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
นักดนตรี 4	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0
นักดนตรี 5	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
นักดนตรี 6	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1
นักดนตรี 7	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0
นักดนตรี 8	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
นักดนตรี 9	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1
นักดนตรี 10	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1

ตารางที่ ก-11 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกันชุดที่ 1

เพลง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
นักดนตรี 1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0
นักดนตรี 2	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0
นักดนตรี 3	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0
นักดนตรี 4	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0
นักดนตรี 5	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0
ความยาวเพลง	1	4	4	3	2	4	3	2	4	4	3	1	2	4	2	3

ตารางที่ ก-12 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกันชุดที่ 2

เพลง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
นักดนตรี 1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0
นักดนตรี 2	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0
นักดนตรี 3	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1
นักดนตรี 4	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0
นักดนตรี 5	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1
ความยาวเพลง	3	3	1	1	2	4	4	2	1	2	4	2	4	1	1	3

ตารางที่ ก-13 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกันชุดที่ 3

เพลง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
นักดนตรี 1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0
นักดนตรี 2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
นักดนตรี 3	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0
นักดนตรี 4	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
นักดนตรี 5	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0
ความยาวเพลง	2	1	1	1	2	3	1	4	2	1	3	4	1	3	3	4

ตารางที่ ก-14 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกันชุดที่ 4

เพลง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
นักดนตรี 1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1
นักดนตรี 2	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1
นักดนตรี 3	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1
นักดนตรี 4	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1
นักดนตรี 5	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1
ความยาวเพลง	4	1	2	1	1	3	1	4	1	1	3	4	1	1	3	2

ตารางที่ ก-15 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกันชุดที่ 5

เพลง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
นักดนตรี 1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0
นักดนตรี 2	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0
นักดนตรี 3	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1
นักดนตรี 4	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
นักดนตรี 5	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1
ความยาวเพลง	1	1	4	1	2	4	2	4	2	4	3	3	1	4	1	1

ตารางที่ ก-16 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกันชุดที่ 6

เพลง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
นักดนตรี 1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1
นักดนตรี 2	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0
นักดนตรี 3	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1
นักดนตรี 4	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
นักดนตรี 5	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1
ความยาวเพลง	3	3	1	2	3	1	2	4	3	4	1	3	2	2	4	4

ตารางที่ ก-17 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกันชุดที่ 7

เพลง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
นักดนตรี 1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1
นักดนตรี 2	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0
นักดนตรี 3	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1
นักดนตรี 4	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0
นักดนตรี 5	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1
ความยาวเพลง	4	4	2	4	2	1	4	3	2	4	4	4	2	3	4	3

ตารางที่ ก-18 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกันชุดที่ 8

เพลง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
นักดนตรี 1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1
นักดนตรี 2	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1
นักดนตรี 3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0
นักดนตรี 4	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0
นักดนตรี 5	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0
ความยาวเพลง	2	3	1	2	4	1	2	3	4	4	2	2	1	3	4	1

ตารางที่ ก-19 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกันชุดที่ 9

เพลง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
นักดนตรี 1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
นักดนตรี 2	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0
นักดนตรี 3	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0
นักดนตรี 4	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1
นักดนตรี 5	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1
ความยาวเพลง	3	3	4	3	1	1	3	1	4	3	1	4	4	2	3	2

ตารางที่ ก-20 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกันชุดที่ 10

เพลง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
นักดนตรี 1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
นักดนตรี 2	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0
นักดนตรี 3	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
นักดนตรี 4	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0
นักดนตรี 5	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
ความยาวเพลง	4	2	1	4	3	3	4	2	2	3	3	2	2	1	4	1

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบ ค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และ ค่าจากวิธีการที่นำเสนอ

ตารางที่ ข-1 เวลาในการหาคำตอบในปัญหาส่วนแรกด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์กรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากัน

			ชุดข้อมูล										
จำนวนเพลง	จำนวนนักดนตรี	จำนวนวันที่ทำการซ้อม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
10	10	2	3.75	3.17	4.42	3.28	2.83	3.19	3.64	3.56	3.13	3.53	3.45
12	10	2	4.91	4.42	4.72	4.27	4.34	4.09	4.19	4.09	3.98	5.03	4.40
14	10	2	5.58	5.98	5.70	6.20	5.22	6.08	6.59	5.81	5.64	5.66	5.85
16	10	2	7.09	7.23	10.05	10.31	8.14	8.48	8.03	7.06	6.92	7.08	8.04
10	10	3	5.78	4.38	3.73	3.58	4.36	3.84	3.38	3.53	3.58	6.25	4.24
12	10	3	5.95	4.30	4.49	4.38	5.89	6.74	4.74	5.05	5.63	5.33	5.25
14	10	3	7.95	10.09	9.75	8.00	7.88	8.97	7.89	8.19	8.39	8.03	8.51
16	10	3	11.67	25.95	15.80	22.30	21.25	24.53	11.42	17.24	10.36	16.74	17.73

ตารางที่ ข-2 ค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาส่วนแรกซึ่งหาด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์กรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากัน

			ชุดข้อมูล									
จำนวนเพลง	จำนวนนักดนตรี	จำนวนวันที่ทำการซ้อม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	10	2	19	18	18	19	16	19	19	17	18	19
12	10	2	19	18	18	19	17	19	19	18	19	19
14	10	2	19	19	18	19	18	18	18	18	18	19
16	10	2	18	18	18	19	18	18	18	18	18	19
10	10	3	24	22	22	24	22	24	23	21	23	23
12	10	3	26	24	24	26	24	26	25	23	26	26
14	10	3	25	25	24	26	25	25	25	24	25	25
16	10	3	25	24	25	25	25	24	24	24	25	25

ตารางที่ ข-3 เวลาในการหาคำตอบในปัญหาส่วนแรกด้วยวิธีการฮิวริสติกส์กรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากัน

			ชุดข้อมูล										
จำนวนเพลง	จำนวนนักดนตรี	จำนวนวันที่ทำการซ้อม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
10	10	2	2.88	2.74	2.45	2.99	2.81	3.13	3.26	2.59	2.78	2.89	2.85
12	10	2	5.16	4.61	4.61	5.14	4.88	6.51	7.23	5.22	4.57	5.63	5.36
14	10	2	9.58	10.79	7.78	9.11	8.54	9.94	7.54	8.47	7.49	9.81	8.91
16	10	2	49.01	43.72	46.09	64.69	49.51	50.13	45.84	42.78	49.09	27.52	46.84
10	10	3	3.83	3.71	3.52	3.41	3.27	3.25	3.23	3.38	3.18	3.11	3.39
12	10	3	4.17	4.17	4.07	4.43	4.39	5.07	4.31	4.39	4.29	5.02	4.43
14	10	3	8.98	8.84	8.44	9.33	8.51	8.22	8.09	9.43	9.03	8.67	8.75
16	10	3	147.51	106.72	208.09	106.69	113.03	104.98	105.07	110.09	134.67	108.37	124.52

ตารางที่ ข-4 ค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาส่วนแรกซึ่งหาด้วยวิธีการฮิวริสติกส์กรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากัน

			ชุดข้อมูล									
จำนวนเพลง	จำนวนนักดนตรี	จำนวนวันที่ทำการซ้อม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	10	2	19	18	18	19	16	19	19	17	18	19
12	10	2	19	18	18	19	17	19	19	18	19	19
14	10	2	19	19	18	19	18	18	18	18	18	19
16	10	2	18	18	18	19	18	18	18	18	18	19
10	10	3	24	22	22	24	22	24	23	21	23	23
12	10	3	26	24	24	26	24	26	25	23	26	26
14	10	3	25	25	24	26	25	25	25	24	25	25
16	10	3	25	24	25	25	25	24	24	24	25	25

ตารางที่ ข-5 เวลาในการหาคำตอบในปัญหาส่วนที่สองด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์กรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากัน

			ชุดข้อมูล										
จำนวนเพลง	จำนวนนักดนตรี	จำนวนวันที่ทำการซ้อม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
10	10	2	9.98	35.22	14.06	18.39	4.70	12.77	12.13	52.52	5.78	34.17	19.9719
12	10	2	52.17	128.23	155.41	233.64	42.92	131.99	93.16	231.83	79.55	1112.78	226.167
14	10	2	872.73	3094.64	423.00	2110.83	296.41	2838.73	91.19	2049.37	139.55	7388.34	1930.48
16	10	2	487.84	7418.64	948.53	7485.91	2550.80	1297.03	1039.93	6616.75	421.86	7424.48	3569.18
10	10	3	36.28	43.36	73.78	76.34	40.89	206.67	94.13	42.08	86.28	160.58	86.0391
12	10	3	221.28	147.98	88.20	108.53	84.91	38.56	102.47	105.17	65.45	156.47	111.903
14	10	3	2418.27	7498.33	4316.14	7541.61	7606.16	4222.05	2303.27	7541.11	3309.07	7456.73	5421.27
16	10	3	7470.17	7512.75	7505.59	7434.78	7434.89	7458.95	7503.81	7474.41	2706.86	7467.42	6996.96

ตารางที่ ข-6 ค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาส่วนที่สองซึ่งหาด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์กรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากัน

			ชุดข้อมูล									
จำนวนเพลง	จำนวนนักดนตรี	จำนวนวันที่ทำการซ้อม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	10	2	2	3	4	5	4	4	3	5	2	6
12	10	2	5	10	9	7	7	7	5	6	4	10
14	10	2	8	10	13	12	10	12	11	11	9	12
16	10	2	15	18	20	13	13	15	13	19	10	16
10	10	3	1	2	3	2	1	4	4	1	1	4
12	10	3	2	3	4	3	3	1	3	1	1	3
14	10	3	4	6	7	5	4	5	4	4	3	7
16	10	3	6	10	9	11	8	9	7	10	7	9

ตารางที่ ข-7 เวลาในการหาคำตอบในปัญหาส่วนที่สองด้วยวิธีการที่นำเสนอกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากัน

			ชุดข้อมูล										
จำนวนเพลง	จำนวนนักดนตรี	จำนวนวันที่ทำการซ้อม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
10	10	2	0.68	0.23	0.23	1.21	0.07	1.04	2.02	0.23	0.07	0.72	0.65
12	10	2	3.74	0.38	1.12	6.25	0.38	15.02	25.65	3.68	1.84	5.64	6.37
14	10	2	99.77	179.76	8.82	124.21	41.58	2.96	2.96	23.41	2.94	143.59	63
16	10	2	27.56	27.56	27.5	2904.2	302.12	54.87	54.84	27.63	27.52	1707.6	516.14
10	10	3	0.21	0.04	0.03	0.12	0.07	0.04	0.02	0.11	0.02	0.02	0.068
12	10	3	0.09	0.05	0.04	0.26	0.09	0.39	0.06	0.13	0.09	0.42	0.162
14	10	3	0.56	0.79	0.44	2.95	2.59	0.49	0.79	2.02	0.79	0.44	1.186
16	10	3	96.72	0.39	30.123	0.77	48.63	0.39	0.39	16.71	149.31	10.26	35.369

ตารางที่ ข-8 ค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาส่วนที่สองซึ่งหาด้วยวิธีการที่นำเสนอกรณีที่ความยาวเพลงทุกเพลงเท่ากัน

			ชุดข้อมูล									
จำนวนเพลง	จำนวนนักดนตรี	จำนวนวันที่ทำการซ้อม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	10	2	2	3	4	5	4	4	3	5	2	6
12	10	2	5	10	9	7	7	7	5	6	4	10
14	10	2	8	10	13	12	10	12	11	11	9	12
16	10	2	15	18	20	13	13	15	13	19	10	16
10	10	3	1	2	3	2	1	4	4	1	1	4
12	10	3	2	3	4	3	3	1	3	1	1	3
14	10	3	4	6	7	5	4	5	4	4	3	7
16	10	3	6	10	9	11	7	7	7	10	7	8

ตารางที่ ข-9 เวลาในการหาคำตอบในปัญหาส่วนแรกด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์กรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกัน

			ชุดข้อมูล										
จำนวนเพลง	จำนวนนักดนตรี	จำนวนวันที่ทำการซ้อม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
10	5	2	8.252	4.524	4.337	4.431	5.694	6.209	6.646	5.616	6.068	6.927	5.8704
12	5	2	13.104	13.774	7.706	7.661	8.658	13.759	13.011	8.191	8.362	11.295	10.5521
14	5	2	16.567	17.207	10.093	10.202	16.193	19.703	75.769	15.242	15.101	55.411	25.1488
10	5	3	29.312	7.831	5.101	4.244	7.582	8.003	39.031	12.652	6.911	65.957	18.6624
12	5	3	76.347	36.239	24.991	20.858	27.191	158.746	146.172	28.953	58.407	73.069	65.0973
14	5	3	171.211	89.155	67.548	15.382	89.559	95.176	115.222	28.626	22.667	128.872	82.3418
16	5	3	255.684	342.14	293.327	887.439	142.35	418.159	783.683	241.067	197.902	625.717	418.747

ตารางที่ ข-10 ค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาส่วนแรกซึ่งหาด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์กรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกัน

			ชุดข้อมูล									
จำนวนเพลง	จำนวนนักดนตรี	จำนวนวันที่ทำการซ้อม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	5	2	9	9	8	9	8	9	9	8	9	8
12	5	2	9	9	9	9	8	9	9	8	9	9
14	5	2	9	9	9	9	8	9	9	9	9	9
10	5	3	12	12	10	12	11	11	14	10	13	11
12	5	3	12	12	10	12	11	12	12	11	12	11
14	5	3	12	12	11	12	12	11	11	11	11	12
16	5	3	11	12	12	13	12	11	12	12	11	12

ตารางที่ ข-11 เวลาในการหาคำตอบในปัญหาส่วนแรกด้วยวิธีการฮิวริสติกส์กรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกัน

			ชุดข้อมูล										
จำนวนเพลง	จำนวนนักดนตรี	จำนวนวันที่ทำการซ้อม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
10	5	2	6.005	4.269	4.433	4.367	4.436	4.352	4.201	4.243	4.226	4.167	4.47
12	5	2	9.578	6.712	11.77	6.484	6.453	6.693	6.216	6.497	6.481	6.6	7.348
14	5	2	15.43	15.11	21.07	14.6	14.67	15.03	14.83	15.6	14.36	9.823	15.05
10	5	3	6.388	6.053	5.124	6.715	5.091	5.045	5.366	5.07	5.402	5.328	5.558
12	5	3	10.97	8.516	8.245	8.121	7.797	8.33	8.329	8.072	8.206	7.937	8.452
14	5	3	43.99	31.15	23.01	22.84	24.64	23.56	22.67	22.72	22.69	22.84	26.01
16	5	3	39.96	22.93	37.49	49.99	37.31	38.49	39.14	38.18	35.11	24.55	36.31

ตารางที่ ข-12 ค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาส่วนแรกซึ่งหาด้วยวิธีการฮิวริสติกส์กรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกัน

			ชุดข้อมูล									
จำนวนเพลง	จำนวนนักดนตรี	จำนวนวันที่ทำการซ้อม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	5	2	9	9	8	9	8	9	9	8	9	8
12	5	2	9	9	9	9	8	9	9	8	9	9
14	5	2	9	9	9	9	8	9	9	9	9	9
10	5	3	12	12	10	12	11	11	14	10	13	11
12	5	3	12	12	10	12	11	12	12	11	12	11
14	5	3	12	12	11	12	12	11	11	11	11	12
16	5	3	11	12	12	13	12	11	12	12	11	12

ตารางที่ ข-13 เวลาในการหาคำตอบในปัญหาส่วนที่สองด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์กรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกัน

			ชุดข้อมูล										
จำนวนเพลง	จำนวนนักดนตรี	จำนวนวันที่ทำการซ้อม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
10	5	2	51.36	9.24	45.94	5.93	62.45	426.07	13.74	39.75	49.73	193.33	89.75
12	5	2	1874.13	366.10	12.84	14.09	273.03	1146.70	672.83	26.52	800.86	7203.28	1239.04
14	5	2	7203.64	530.07	522.74	50.70	388.05	4452.95	181.07	33.01	7203.31	7203.48	2776.90
10	5	3	1294.46	87.49	20.06	9.56	9.56	43.07	615.13	549.64	9.64	15.26	265.39
12	5	3	1392.94	7203.17	863.54	9.94	39.83	119.59	208.18	7.47	3173.73	8166.51	2118.49
14	5	3	3574.45	10361.79	29800.39	40.14	722.56	43203.65	639.54	104.22	43203.34	1123.19	13277.33
16	5	3	26923.93	9026.04	1369.70	64.19	43203.29	43203.67	1740.26	2156.25	10969.38	2976.83	14163.35

ตารางที่ ข-14 ค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาส่วนที่สองซึ่งหาด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์กรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกัน

			ชุดข้อมูล									
จำนวนเพลง	จำนวนนักดนตรี	จำนวนวันที่ทำการซ้อม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	5	2	0	0	1	0	1	1	0	0	1	4
12	5	2	5	1	0	0	4	1	0	0	1	3
14	5	2	2	3	0	2	7	1	0	0	1	3
10	5	3	0	1	1	0	0	0	0	2	0	0
12	5	3	3	1	2	0	0	0	0	0	1	2
14	5	3	3	1	1	0	0	1	0	0	1	0
16	5	3	2	1	0	0	1	1	0	0	2	0

ตารางที่ ข-15 เวลาในการหาคำตอบในปัญหาส่วนที่สองด้วยวิธีการที่นำเสนอกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกัน

			ชุดข้อมูล										
จำนวนเพลง	จำนวนนักดนตรี	จำนวนวันที่ทำการซ้อม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
10	5	2	44.25	51.62	14.75	22.12	29.50	29.50	14.75	14.75	14.75	7.37	24.34
12	5	2	76.05	152.09	779.48	9.51	19.01	85.55	66.54	19.01	28.52	104.56	134.03
14	5	2	497.10	170.88	1693.25	15.53	62.14	295.15	279.62	450.50	295.15	341.76	410.11
10	5	3	36.14	27.10	18.07	659.50	63.24	9.03	54.21	36.14	72.27	117.44	109.31
12	5	3	9.28	18.56	27.84	27.84	9.28	83.53	27.84	55.68	157.77	27.84	44.55
14	5	3	27.42	191.93	123.38	246.77	726.60	27.42	27.42	95.97	68.55	411.28	194.67
16	5	3	10.50	31.50	692.97	3118.38	304.49	10.50	84.00	430.48	52.50	335.99	507.13

ตารางที่ ข-16 ค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาส่วนที่สองซึ่งหาด้วยวิธีการที่นำเสนอกรณีที่ความยาวเพลงแตกต่างกัน

			ชุดข้อมูล									
จำนวนเพลง	จำนวนนักดนตรี	จำนวนวันที่ทำการซ้อม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	5	2	0	0	1	0	1	1	0	0	1	4
12	5	2	5	1	0	0	4	1	0	0	1	3
14	5	2	2	3	0	2	7	1	0	0	1	3
10	5	3	0	1	1	0	0	0	0	2	0	0
12	5	3	3	1	2	0	0	0	0	0	1	2
14	5	3	3	1	1	0	0	1	0	0	1	0
16	5	3	2	1	0	0	1	0	0	0	2	0

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนพปฎล สกุลสม เกิดเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2527 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปลาย จากโรงเรียนสระบุรีวิทยาคม จังหวัดสระบุรี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตบัณฑิต วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการบินและอวกาศ จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา พ.ศ. 2551 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2552