KKU Res. J. 2012; 17(4):639-659
http : //resjournal.kku.ac.th

การแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยด้วยเมตาฮิวริสติก: การทบทวนวรรณกรรม

Solving of University Course Timetabling Problem by Meta-heuristic: A Literature Review

วุฒิพงษ์ ชินศรี, นิดาพรรณ สุรีรัตนันท์ และ สรเดช ครุฑจ้อน*
Wutthipong Chinnasri, Nidapan Sureerattanan and Soradech Krootjohn*

ภาควิชาคอมพิวเตอร์ศึกษา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
**Correspondent author: c.wutthipong@gmail.com*

บทคัดย่อ

การจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยเป็นปัญหาที่ยากในการแก้ไข มีข้อบังคับที่ต้องพิจารณาเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกใช้วิธีการที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพทั้งในส่วนของคุณภาพของตารางสอนและทรัพยากรที่ใช้ บทความปริทรรศน์นี้ได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแล้วนำมาวิเคราะห์ เปรียบเทียบ และอภิปราย โดยมุ่งเน้นวิธีการที่เป็นที่รู้จักในกลุ่มเมตาฮิวริสติกที่มีการนำมาใช้แก้ไขปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย ได้แก่ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม การจำลองการอบเหนียว การค้นหาแบบตาบู และการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณาจักรมด ตลอดจนได้นำเสนอข้อสรุปและข้อแนะนำสำหรับการวิจัยในอนาคตต่อไป

Abstract

University Course Timetabling Problem (UCTP) is a difficult problem to solve. There are many constraints to be considered. Then, an appropriate and effective (quality of timetable and resource usage) method is needed. This review article had collected relevant researches for analysis, comparison, and discussion by focusing on well-known methods in meta-heuristic approach for UCTP. These methods include Genetic Algorithm (GA), Simulated Annealing (SA), Tabu Search (TS), and Ant Colony Optimization (ACO). Conclusions and suggestions are also made for future research.

คำสำคัญ: ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม การจำลองการอบเหนียว การค้นหาแบบตาบู การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณาจักรมด

Keywords: university course timetabling problem, Genetic Algorithm, Simulated Annealing, Tabu Search, Ant Colony Optimization

1. บทนำ

การจัดตาราง คือ การจัดสรรทรัพยากรภายใต้ข้อบังคับต่างๆ ลงในช่วงเวลาที่มีในแนวทางที่น่าพอใจหรือใกล้เคียงกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการที่สุด ความหมายที่กล่าวมานั้นแปลมาจาก (1) ที่ให้นิยามไว้ว่า “การจัดตาราง คือ การจัดสรรทรัพยากรต่างๆ ภายใต้ข้อบังคับลงในช่วงเวลาที่มีอยู่ โดยตารางที่ได้นั้นจะต้องตอบสนองหรือใกล้เคียงกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการ” สำหรับแนวทางที่ใช้ในการจัดตารางสอนคือ นำข้อมูลที่ใช้ในการจัดตารางสอน ได้แก่ ข้อมูลวิชา ข้อมูลอาจารย์ และข้อมูลของผู้เรียน จัดลงในช่วงเวลาที่ว่างของแต่ละห้องใน 1 สัปดาห์ โดยที่ข้อมูลนั้นต้องไม่ถูกจัดซ้ำอีกในช่วงเวลาเดียวกันของวัน ตารางสอนนั้นจึงจะสามารถนำไปใช้ได้

ตารางสอนโดยทั่วไปนั้น แถวแรกในแนวนอนจะแสดงเวลาของแต่ละวัน ส่วนแนวตั้งในสดมภ์แรกจะแสดงวันของสัปดาห์ ภายในตารางจะมีเหตุการณ์ระบุไว้ในช่วงเวลาต่างๆ ของแต่ละห้อง ดังตัวอย่างในตารางที่ 1

ตารางที่ 1. แสดงตัวอย่างตารางสอน สาขาการจัดการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยรังสิต ในมุมมองของห้องเรียน

ห้อง 5-330A	9.00 – 11.45	12.00 – 14.45	15.00 – 17.45
วันจันทร์	IMA218 (01) ดร.จิรัชฌา	IMA312 (01) ดร.จิรัชฌา	
วันอังคาร	IMA412 (01) ดร.จิรัชฌา	IMA212 (01) อ.ชุลีกร	
วันพุธ	IMA203 (01) อ.ชุลีกร	IMA316 (01) อ.วิไลลักษณ์	CGM222 (01) อ.ภณสุทธิ์
วันพฤหัสบดี	IMA223 (01) อ.ชุลีกร		
วันศุกร์	IMA227 (01) อ.พัชร		

ตัวอย่างการอ่านข้อมูลจากตารางสอนตามตารางที่ 1 เช่น ชั้นเรียนของวิชา IMA218 มีอาจารย์ผู้สอนคือ ดร.จิรัชฌา โดยกลุ่มผู้เรียน คือนักศึกษาที่ลงทะเบียนเรียนในกลุ่มที่ 1 ซึ่งจะมีการจัดการเรียนการสอนวันจันทร์ในช่วงเวลา 09.00 น. – 11.45 น. ห้อง 5-330A เป็นต้น

การจัดตารางสอนนับเป็นปัญหาวิจัยที่สำคัญทั้งในด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและด้านการศึกษา เพราะการจัดตารางสอนเป็นสิ่งจำเป็นกับทุกสถานศึกษาไม่ว่าจะเป็นสถานศึกษาในระดับใดก็ตาม ต้องทำการจัดตารางสอนอยู่เป็นประจำทุกๆ ภาคการศึกษา หากสถานศึกษามีขนาดใหญ่ ปัญหาในการจัดตารางสอนก็จะมีความซับซ้อนมากขึ้นตามไปด้วย ปัจจัยที่เกี่ยวข้องก็มีความแตกต่างกันในแต่ละสถานศึกษา เช่น จำนวนอาจารย์, จำนวนนักศึกษา, จำนวนวิชา, จำนวนห้องเรียน เป็นต้น และยังต้องคำนึงถึงข้อบังคับต่างๆ ของแต่ละสถานศึกษาด้วย เช่น จำนวนนักศึกษาที่รับได้ของห้องเรียน, ประเภทห้องเรียน, จำนวนคาบเรียนในแต่ละวัน เป็นต้น อีกทั้งปัจจัยและข้อบังคับต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางสอนในแต่ละภาคเรียนมักจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ดังนั้นการจัดตารางสอนให้เหมาะสมกับแต่ละสถานศึกษานั้นจึงไม่ใช่เรื่องง่ายและต้องใช้เวลานาน ซึ่งบางครั้งเมื่อจัดเสร็จแล้วอาจต้องจัดซ้ำอีก หากมีการปรับเปลี่ยนปัจจัยต่างๆ หรือข้อบังคับที่เกี่ยวข้อง ทำให้ต้องอาศัยบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญหรือมีประสบการณ์เป็นอย่างมาก จึงจะสามารถจัดตารางสอนได้รวดเร็วและเหมาะสม

กับสถานศึกษานั้นๆ

ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย (University Course Timetabling Problem: UCTP) นั้น เป็นที่รู้กันดีว่าเป็นปัญหาประเภท NP-Hard (2–8) ซึ่งหมายความว่าปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยนั้นเป็นปัญหาที่ยากจะแก้ไขด้วยวิธีการทั่วๆ ไป และต้องใช้เวลามากในการแก้ไขปัญหาเพื่อให้เป็นที่พึงพอใจของผู้ใช้งาน นอกจากนั้นระยะเวลาในการแก้ไขปัญหาประเภทนี้จะเพิ่มมากขึ้นตามขนาดของปัญหาด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเลือกใช้วิธีการที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหานี้ อีกทั้งวิธีการที่นำมาใช้นั้นจะต้องสามารถจัดการกับข้อบังคับต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับปัญหาได้เป็นอย่างดี วิธีการต่างๆ ทางด้านปัญญาประดิษฐ์ได้ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหานี้ ซึ่งแต่ละวิธีการมีทั้งข้อดีและข้อเสียในตัวของมันเอง ด้วยเหตุนี้ จึงไม่สามารถที่จะเปรียบเทียบวิธีการเหล่านั้นได้โดยตรงว่าวิธีการใดเป็นวิธีการที่ดีที่สุดในการแก้ไขปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย (5)

บทความปริทรรศน์นี้ได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแล้วนำมาวิเคราะห์ เปรียบเทียบ และอภิปราย โดยมุ่งเน้นวิธีการในกลุ่มเมตาฮิวริสติกซึ่งเป็นที่นิยมใช้แก้ไขปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย โดยเนื้อหาการนำเสนอในส่วนต่อจากนี้ ได้แก่ ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย วิธีการต่างๆ ที่ใช้ในการแก้ปัญหานี้ โดยเฉพาะวิธีการในกลุ่มของเมตาฮิวริสติก การเปรียบเทียบวิธีการและแนวทางต่างๆ ที่ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย อภิปรายผลที่ได้จากการศึกษา และการนำเสนอข้อสรุปและข้อแนะนำสำหรับการวิจัยในอนาคต

2. ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย

ในหัวข้อนี้จะอธิบายลักษณะของปัญหา ข้อบังคับต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการแก้ไขปัญหานี้

การจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย เป็นการจัดวิชาเรียน ผู้สอน ผู้เรียน และห้องเรียน ลงในช่วงเวลาที่มีอยู่ในหนึ่งสัปดาห์ โดยต้องคำนึงถึงข้อบังคับต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งตารางสอนที่ได้นั้น จะต้องได้รับความพึงพอใจจากผู้ใช้ ซึ่งหมายถึง ผู้สอนและผู้เรียน ให้มากที่สุด โดยปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยนั้น มีอยู่ 2 ประเภทหลัก (9) คือ

1. การจัดตารางสอนหลังจากการลงทะเบียน (Post-Enrollment Course TimeTabling: PE-CTT) ตารางสอนประเภทนี้จะถูกจัดหลังจากมีการลงทะเบียนของผู้เรียนที่จะทำการลงทะเบียนเรียนในวิชาต่างๆ ทำให้อาจเกิดความเสี่ยงในการจัดตารางสอนได้ หากห้องเรียนมีจำนวนน้อยไม่เพียงพอกับจำนวนผู้เรียน การจัดตารางสอนประเภทนี้จึงต้องคำนึงถึงการใช้ทรัพยากรต่างๆ ที่มีอยู่ให้มีประสิทธิภาพที่สุดเท่าที่จะทำได้ สำหรับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางสอนประเภทนี้ เช่น วิชาที่จะต้องถูกจัดลงในห้องเรียน ผู้เรียนที่จะเรียนในแต่ละวิชา อุปกรณ์ต่างๆ ที่ต้องใช้ในห้องเรียนซึ่งจะต้องเหมาะสมกับแต่ละวิชา ห้องเรียนซึ่งจะมีการกำหนดว่าสามารถรองรับผู้เรียนได้จำนวนเท่าไร เป็นต้น

2. การจัดตารางสอนบนพื้นฐานของหลักสูตร (Curriculum-Based Course TimeTabling: CB-CTT) ตารางสอนประเภทนี้มักจะถูกจัดก่อนที่จะมีการลงทะเบียน เนื่องจากตารางสอนประเภทนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลการลงทะเบียนในการจัดตารางสอน เพราะจะทำการจัดตารางสอนสำหรับแต่ละหลักสูตรซึ่งทางมหาวิทยาลัยจะให้ผู้เรียนทำการลงทะเบียนเรียนตามหลักสูตรที่กำหนดให้ สำหรับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางสอนประเภทนี้ เช่น วิชาเรียนที่จะมีการกำหนดว่าจะมีใครเป็นผู้สอนและจะสามารถรองรับผู้เรียนได้จำนวนเท่าไร ห้องเรียนซึ่งจะมีการกำหนดว่าสามารถรองรับผู้เรียนได้จำนวนเท่าไรและเหมาะกับการจัดการเรียนการสอนในวิชาประเภทใด จำนวนวันและช่วงเวลาในแต่ละวันที่สามารถจัดวิชาเรียนลงไปได้ซึ่งโดยปกติแล้วในแต่ละวันจะมีจำนวนเท่าๆ กัน หลักสูตรที่มีข้อมูลของรายวิชาที่ต้องการจัดให้อยู่ในหลักสูตรนั้น เป็นต้น

ดังนั้น แต่ละมหาวิทยาลัยจะมีความแตกต่างกันในเรื่องของการจัดตารางสอนทั้งเรื่องของปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมไปถึงข้อบังคับที่ใช้ในการจัดตารางสอน

นั้นมีความแตกต่างกัน ทำให้ปัญหานี้มีความยุ่งยากในสถานการณ์หรือปัญหาที่เกิดขึ้นในชีวิตจริง (10,11)

สิ่งที่ทำให้ปัญหาการจัดตารางสอนมีความยาก คือ ข้อบังคับในการจัดตารางสอนมีจำนวนมาก (11) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ ข้อบังคับแบบเข้มงวด และข้อบังคับแบบผ่อนปรน (2,3,5,6,8,10,12–15) โดยข้อบังคับแบบเข้มงวดนั้นจะต้องได้รับการพิจารณาเป็นพิเศษ เนื่องจากตารางสอนที่ละเมิดข้อบังคับแบบเข้มงวดแม้เพียงข้อเดียว ก็จะไม่สามารถนำไปใช้ได้ (Infeasible timetable) ในขณะที่ข้อบังคับแบบผ่อนปรนอาจถูกละเมิดได้ แต่อาจทำให้เกิดความไม่สะดวกในการใช้งานซึ่งส่งผลต่อความพึงพอใจของผู้ใช้ ระดับการละเมิดข้อบังคับแบบผ่อนปรนจึงมักถูกใช้ในการพิจารณาความเหมาะสมของตารางสอนที่จะนำไปใช้ ดังนั้นการจัดตารางสอนที่จะทำให้เกิดความพึงพอใจกับผู้ใช้มากที่สุดจึงควรละเมิดข้อบังคับแบบผ่อนปรนให้น้อยที่สุด เพราะการจัดตารางสอนโดยไม่ละเมิดข้อบังคับแบบผ่อนปรนเลยนั้น คงทำได้เฉพาะกับปัญหาที่มีขนาดเล็กและไม่มีความซับซ้อนเท่านั้น (16)

2.1 ข้อบังคับแบบเข้มงวดและข้อบังคับแบบผ่อนปรนที่มักใช้ในการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย

จากข้อมูลข้อบังคับทั้งแบบเข้มงวดและแบบผ่อนปรนที่กล่าวมา ผู้เขียนจะอธิบายโดยจำแนกออกเป็น 3 กลุ่ม ตามปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.1.1 ข้อบังคับสำหรับผู้สอน

C1: ผู้สอนจะต้องสอนเพียงหนึ่งวิชาในช่วงเวลาเดียวกันเท่านั้น (ข้อบังคับแบบเข้มงวด)

C2: ผู้สอนอาจจะมีช่วงเวลาว่างที่ตนต้องการได้ (ข้อบังคับแบบผ่อนปรน)

C3: ควรจะใช้เวลาในการเดินทางระหว่างห้องเรียนให้น้อยที่สุดหรือถ้าเป็นไปได้ควรสอนในห้องเรียนเดิม (ข้อบังคับแบบผ่อนปรน)

C4: ควรมีช่วงเวลาว่างระหว่างการสอนในแต่ละวิชาของวันให้น้อยที่สุด (ข้อบังคับแบบผ่อนปรน)

2.1.2 ข้อบังคับสำหรับผู้เรียน

C5: ผู้เรียนจะต้องเรียนเพียงหนึ่งวิชาในช่วงเวลาเดียวกันเท่านั้น (ข้อบังคับแบบเข้มงวด)

C6: ถ้าเป็นไปได้ไม่ควรมีวิชาเรียนในช่วงเย็นของแต่ละวัน (ข้อบังคับแบบผ่อนปรน)

C7: ถ้าเป็นไปได้ไม่ควรมีวิชาเรียนเพียงวิชาเดียวในแต่ละวัน (ข้อบังคับแบบผ่อนปรน)

C8: ถ้าเป็นไปได้ไม่ควรมีวิชาเรียนติดต่อกันมากกว่า 2 วิชา ในแต่ละวัน (ข้อบังคับแบบผ่อนปรน)

C9: ควรจะใช้เวลาในการเดินทางระหว่างห้องเรียนให้น้อยที่สุดหรือถ้าเป็นไปได้ควรเรียนในห้องเรียนเดิม (ข้อบังคับแบบผ่อนปรน)

2.1.3 ข้อบังคับสำหรับห้องเรียน

C10: ห้องเรียนจะต้องถูกใช้เรียนเพียงหนึ่งวิชาในช่วงเวลาเดียวกันเท่านั้น (ข้อบังคับแบบเข้มงวด)

C11: ห้องเรียนจะต้องถูกใช้กับวิชาที่เหมาะสมเท่านั้น (ข้อบังคับแบบเข้มงวด)

C12: จะต้องไม่จัดวิชาเรียนลงในช่วงเวลาที่ห้องเรียนถูกกำหนดไว้ให้ใช้ทำกิจกรรมอื่นๆ (ข้อบังคับแบบเข้มงวด)

C13: ห้องเรียนควรจะมีขนาดที่เหมาะสมกับจำนวนผู้เรียน (เป็นข้อบังคับแบบเข้มงวดในบางงานวิจัยและเป็นข้อบังคับแบบผ่อนปรนในบางงานวิจัย)

C14: ห้องเรียนควรมีช่วงเวลาว่างที่ไม่ได้ถูกจัดให้มีกิจกรรมใดๆ ให้น้อยที่สุด (ข้อบังคับแบบผ่อนปรน)

จากข้อบังคับดังกล่าว จะมีข้อบังคับที่เป็นแบบเข้มงวดจำนวน 5 ข้อ ข้อบังคับที่เป็นแบบผ่อนปรนจำนวน 8 ข้อ และอีก 1 ข้อ (C13) ที่อาจถูกจัดเป็นข้อบังคับแบบเข้มงวดหรือแบบผ่อนปรน ขึ้นอยู่กับแต่ละมหาวิทยาลัย แต่จากการทบทวนงานวิจัยข้างต้น ส่วนใหญ่จะถูกจัดเป็นข้อบังคับแบบเข้มงวด มีเพียงบางงานวิจัย (17,18) ที่จัดเป็นข้อบังคับแบบผ่อนปรน สำหรับข้อบังคับแบบผ่อนปรนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ ข้อบังคับ C2, C6, C7, และ C8 (ดูตารางที่ 2 ประกอบ)

ตารางที่ 2. แสดงข้อบังคับแบบเข้มงวดและแบบผ่อนปรนที่มักใช้ในงานวิจัยเกี่ยวกับการจัดตารางสอน

งานวิจัยอ้างอิง	ประเภทของปัญหาการจัดตารางสอน	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
Ceschia, Di Gaspero, & Schaerf, 2011 (19)	PE-CTT					●	○	○	○		●	●		●	
Yang & Jat, 2011 (6)	PE-CTT					●	○	○	○		●	●		●	
Al-Betar & Khader, 2010 (12)	PE-CTT					●	○	○	○		●			●	
Chaudhuri & Kajal, 2010 (20)	CB-CTT	●	○	○	○	●					●	●	●		○
Cagdas Hakan Aladag et al., 2009 (17)	CB-CTT	●	○					○			●	●	●	○	
Ayob & Jaradat, 2009 (2)	PE-CTT					●	○	○	○		●	●		●	
Pongcharoen, Promtet, Yenradee, & Hicks, 2008 (21)	CB-CTT	●	○			●				○	●				
Rubio, Johnson, & Crawford, 2008 (22)	PE-CTT					●	○	○	○		●	●			
Mayer, Nothegger, Chwatal, & Raidl, 2008 (23)	PE-CTT					●	○	○	○		●	●		●	
S. Abdullah & Hamdan, 2008 (24)	PE-CTT					●	○	○	○		●	●		●	
Edmund K. Burke, McCollum, et al., 2007 (10)	PE-CTT					●	○	○	○		●	●		●	
Chiarandini, Birattari, Socha, & Rossi-Doria, 2006 (25)	PE-CTT					●	○	○	○		●	●		●	
Bai, Burke, Kendall, & Mccollum, 2006 (26)	PE-CTT					●	○	○			●	●		●	
Kazarlis et al., 2005 (13)	CB-CTT	●	○	○	○					○	●		●		○
Socha et al., 2003 (7)	PE-CTT					●	○	○	○		●	●		●	
Rossi-Doria et al., 2003 (5)	PE-CTT					●	○	○	○		●	●		●	
Alvarez-Valdes et al., 2002 (18)	CB-CTT	●	○							○	●	●		○	

● หมายถึง ข้อบังคับนั้นถูกจัดให้เป็นข้อบังคับแบบเข้มงวด

○ หมายถึง ข้อบังคับนั้นถูกจัดให้เป็นข้อบังคับแบบผ่อนปรน

3. วิธีการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย

วิธีการต่างๆ ถูกนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

1. วิธีการแบบซีเควนเชียล (Sequential) สำหรับวิธีการในกลุ่มนี้จะทำการจัดลำดับเหตุการณ์และทำการกำหนดเหตุการณ์เหล่านั้นลงในช่วงเวลาตามลำดับที่ได้จัดเอาไว้ โดยต้องไม่มีเหตุการณ์ใดที่เกิดความขัดแย้งกับเหตุการณ์อื่นๆ (16) แนวทางนี้ เมื่อนำมาใช้กับการจัดตารางสอนจะนิยมนำเสนอในรูปแบบกราฟ โดยเหตุการณ์ต่างๆ จะเปรียบเสมือนโหนดแต่ละโหนดของกราฟ ในขณะที่ความขัดแย้งระหว่างเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจะนำเสนอด้วยค่าของระยะทางที่เชื่อมระหว่างโหนด (27)

2. วิธีการแบบคลัสเตอร์ (Cluster) สำหรับวิธีการในกลุ่มนี้ เหตุการณ์จะถูกแบ่งเป็นกลุ่ม โดยจะต้องไม่ละเมิดข้อบังคับแบบเข้มงวด จากนั้นจะใช้เทคนิคต่างๆ ในการจัดเหตุการณ์แต่ละกลุ่มลงในช่วงเวลาที่มีอยู่โดยต้องคำนึงถึงข้อบังคับแบบผ่อนปรนด้วย (16)

3. วิธีการแบบคอนสเตรนท์เบส (Constraint-based) สำหรับวิธีการในกลุ่มนี้จะทำการจำลองปัญหาให้เป็นเหตุการณ์ที่จะต้องมีส่วนประกอบต่างๆ เช่น วิชาเรียน ห้องเรียน ฯลฯ จากนั้นจะทำการกำหนดกฎเกณฑ์สำหรับใช้ในการจัดส่วนประกอบต่างๆ ลงในเหตุการณ์ โดยในการจัดนั้นจะต้องทำตามข้อบังคับต่างๆ ให้ได้ทั้งหมด (28)

4. วิธีการแบบเมตาฮิวริสติก (Meta-heuristic) สำหรับวิธีการในกลุ่มนี้จะเริ่มต้นจากการสร้างตัวแทนปัญหาขึ้นมา จากนั้นจะนำมาผ่านกระบวนการที่จะช่วยให้ตัวแทนปัญหานั้นมีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยผลลัพธ์ที่ได้จากแนวทางนี้มักจะมีคุณภาพสูงแต่ก็มักจะใช้ทรัพยากรในการประมวลผลที่สูงด้วย

ในช่วงที่ผ่านมานั้น การแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย จะใช้วิธีการแบบซีเควนเชียลและวิธีการแบบคอนสเตรนท์เบส โดยในส่วนของวิธีการแบบซีเควนเชียลจะใช้วิธีการให้สีกราฟ (Graph coloring) ส่วนวิธีการแบบคอนสเตรนท์เบสจะใช้วิธีการโปรแกรมจำนวนเต็ม (Integer programming) แต่อย่างไรก็ตาม แนวทางดังกล่าวนั้นมีแนวโน้มมากขึ้นที่จะไม่สามารถแก้ไขปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยที่มีขนาดใหญ่หรือซับซ้อนได้ เพราะการที่จะไม่ละเมิดข้อบังคับแม้แต่เพียงข้อเดียวนั้นเป็นเรื่องที่เป็นไปได้ยาก (6,10,29) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น สำหรับวิธีการแบบคลัสเตอร์นั้นจะมีข้อเสียในส่วนของการที่จะต้องจัดกลุ่มของเหตุการณ์ตั้งแต่เริ่มต้นการทำงานซึ่งอาจส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้มีคุณภาพต่ำ (16) ทำให้ในปัจจุบัน การแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย จะนิยมใช้วิธีการแบบเมตาฮิวริสติกมากขึ้น เนื่องมาจากมีการศึกษาและค้นพบว่าวิธีการในกลุ่มนี้สามารถใช้ในการแก้ปัญหาประเภทนี้ได้เป็นอย่างดี (14) เช่น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) (6,13,30–37) การจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing) (19,38–41) การค้นหาแบบตาบู (Tabu Search) (14,17,18,42–44) การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณาจักรมด (Ant colony optimization) (7,22,23,45) สำหรับวิธีการอื่นๆ เช่น การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) (46) และ Harmony Search Algorithm (HSA) (12) เริ่มมีการนำมาใช้ในการแก้ปัญหานี้แต่ยังไม่เป็นที่นิยมเมื่อเทียบกับวิธีการที่กล่าวมาก่อนหน้า ดังนั้นในส่วนต่อไปของหัวข้อนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับวิธีการในแนวทางเมตาฮิวริสติกที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้แก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย ได้แก่ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม การจำลองการอบเหนียว การค้นหาแบบตาบู และการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณาจักรมด

3.1 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm)

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมหรือเรียกโดยย่อว่า “GA” ถูกนำเสนอโดย John Holland (47) โดยมีแนวคิดมาจากวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตในระบบชีววิทยา ซึ่งอาศัยหลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติและหลักการทางสายพันธุ์ การทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

จะเริ่มจากการสร้างประชากรเริ่มต้น (Population initialization) และทำการประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness evaluation) เมื่อได้ค่าความเหมาะสมแล้วจะทำการคัดเลือก (Selection) ประชากรมาจำนวนหนึ่ง เพื่อนำมาเป็นต้นกำเนิดทางสายพันธุ์หรือเป็นกลุ่มประชากรรุ่นพ่อแม่ จากนั้นจะนำประชากรเหล่านี้เข้าสู่กระบวนการปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (Genetic operation or Reproduction operators) ซึ่งจะทำให้เกิดกลุ่มประชากรที่เป็นรุ่นลูก และเมื่อนำประชากรกลุ่มนี้ไปประเมินค่าความเหมาะสมแล้วพบคำตอบที่เหมาะสมกับปัญหากระบวนการทำงานก็จะจบลง แต่หากไม่เป็นไปตามนั้น การทำงานก็จะดำเนินต่อไป กล่าวคือ จะนำประชากรรุ่นลูกที่ได้ไปแทนที่ (Replacement) ประชากรรุ่นพ่อแม่ ซึ่งการแทนที่นั้นก็จะมีการพิจารณาว่าควรจะเอาประชากรรุ่นลูกในกลุ่มใด จำนวนเท่าไร ไปแทนประชากรรุ่นพ่อแม่ในกลุ่มใด เมื่อทำการแทนที่เสร็จแล้วก็จะนำประชากรกลุ่มนั้นกลับเข้าสู่กระบวนการคัดเลือกใหม่ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะดำเนินซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งพบคำตอบที่เหมาะสมกับปัญหาหรือจนกว่าจะเป็นไปตามเงื่อนไขในการหยุดทำงาน เช่น ครบจำนวนรุ่นที่กำหนดไว้ เป็นต้น

การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมาช่วยแก้ปัญหาการจัดตารางสอนนั้น จะทำการสร้างตารางสอนมาจำนวนหนึ่ง แล้วนำมาประเมินค่าความเหมาะสมจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สามารถตรวจสอบการละเมิดข้อบังคับต่างๆ ได้ เมื่อได้ค่าความเหมาะสมแล้วจะทำการคัดเลือกตารางสอนเหล่านั้นมาจำนวนหนึ่งเพื่อใช้เป็นต้นกำเนิดทางสายพันธุ์ ซึ่งจะเรียกตารางสอนเหล่านี้ว่าตารางรุ่นพ่อแม่ จากนั้นจะนำตารางสอนเหล่านี้เข้าสู่กระบวนการปฏิบัติการทางสายพันธุ์ โดยกระบวนการนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเหตุการณ์ภายในตารางสอน ซึ่งจะทำให้เกิดตารางสอนอีกจำนวนหนึ่งขึ้นมา โดยจะเรียกตารางสอนที่เกิดขึ้นใหม่ว่าตารางสอนรุ่นลูก จากนั้นจะนำตารางสอนรุ่นลูกที่ได้ มาทำการประเมินค่าความเหมาะสมเพื่อตรวจสอบดูว่าตารางสอนเหล่านี้เป็นตารางสอนที่เหมาะสมแล้วหรือไม่ ถ้าเป็นตารางสอนที่เหมาะสมแล้ว การทำงานก็จะจบลง แต่หากไม่ใช่การทำงานก็จะดำเนินต่อไป โดยการนำตารางสอนรุ่นลูกไปแทนที่ตารางสอนรุ่นพ่อแม่ เพื่อใช้เป็นต้นกำเนิดทางสายพันธุ์ต่อไป กระบวนการก็จะดำเนินซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ตารางสอนที่เหมาะสมหรือจนกว่าจะเป็นไปตามเงื่อนไขในการหยุดทำงาน

การดำเนินการของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจำเป็นต้องคำนึงถึง ตัวแปรที่มีผลกระทบ ได้แก่ จำนวนประชากรเริ่มต้น วิธีการคัดเลือก วิธีการที่ใช้ในการปฏิบัติการทางสายพันธุ์ วิธีการแทนที่ จำนวนรุ่นที่ใช้ ฯลฯ

```
Generate initial population P(0)
t <- 0
WHILE termination conditions not met DO
  Evaluate(P(t))
  P'(t) <- Select(P(t))
  P''(t) <- ApplyReproductionOperators(P'(t))
  P(t+1) <- Replace(P(t),P''(t))
  t <- t+1
ENDWHILE
Return best solution found
```

รูปที่ 1. Genetic Algorithm (Pseudo-code)

3.2 การจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing)

การจำลองการอบเหนียวหรือเรียกโดยย่อว่า "SA" ถูกนำเสนอโดย Scott Kirkpatrick (48) โดยมีแนวคิดมาจากการเลียนแบบวิธีการควบคุมอุณหภูมิของการอบโลหะให้ร้อนแล้วปล่อยให้เย็นลงช้าๆ ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะทำให้โลหะมีคุณสมบัติทางกายภาพที่แข็งแกร่งและทนทาน กระบวนการอบเหนียวของโลหะนั้น จะเริ่มจากการนำโลหะมาเข้าสู่กระบวนการอบเหนียว ตามตารางจัดการการอบเหนียวที่จะมีการกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นและอัตราการปรับลดอุณหภูมิ ซึ่งโดยปกติแล้วมักจะกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นให้มีค่าสูง เนื่องจากความร้อนสูงจะทำให้โครงสร้างของโลหะเกิดการกระจายตัวออก และเมื่อมีการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ โครงสร้างของโลหะที่กระจายตัวออกจะค่อยๆ ทำการจัดเรียงใหม่อย่างเป็นระเบียบ เมื่อถึงขั้นตอนนี้จะมีการประเมินว่าโลหะนั้นมีความแข็งแกร่งและทนทานแล้วหรือไม่ ถ้าเป็นไปตามที่ต้องการแล้ว การทำงานก็จะจบลง แต่หากไม่เป็นไปตามนั้น การทำงานก็จะดำเนินต่อไป โดยการนำโลหะที่ผ่านกระบวนการอบเหนียวในรอบแรกมาเข้าสู่กระบวนการ

อบเหนียวใหม่ ตามตารางจัดการอบเหนียวที่กำหนดไว้ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะดำเนินซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้โลหะที่แข็งแกร่งและทนทานหรือจนกว่าจะเป็นไปตามเงื่อนไขในการหยุดทำงาน เช่น อุณหภูมิมีค่าเป็นศูนย์เป็นต้น

การประยุกต์ใช้การจำลองการอบเหนียวมาช่วยแก้ปัญหาการจัดตารางสอนนั้น จะเริ่มจากการสร้างตารางสอนมาตารางหนึ่ง แล้วนำมาประเมินค่าความเหมาะสมจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สามารถตรวจสอบการละเมิดข้อบังคับต่างๆ ได้ เมื่อได้ค่าความเหมาะสมที่สามารถกำหนดได้ว่าตารางนั้นมีความเหมาะสมมากน้อยเพียงไรแล้ว จะนำตารางนั้นเข้าสู่กระบวนการจำลองการอบเหนียว ตามตารางจัดการอบเหนียวที่จะมีการกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นและอัตราการปรับลดอุณหภูมิเอาไว้ โดยตารางสอนที่มีความเหมาะสมน้อยจะเปรียบเสมือนโลหะที่ยังไม่แข็งแกร่งและทนทาน เมื่อได้รับความร้อนสูง เหตุการณ์ต่างๆ ภายในตารางสอนก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเมื่อทำการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ เหตุการณ์เหล่านั้นก็จะถูกจัดเรียงใหม่ กระบวนการนี้จึงทำให้ได้ตารางสอนใหม่ขึ้นมา หลังจากนั้นจะนำตารางสอนที่ได้มาทำการประเมินค่าความเหมาะสมเพื่อตรวจสอบดูว่าตารางสอนนี้เป็นตารางสอนที่เหมาะสมแล้วหรือไม่ ถ้าเป็นตารางสอนที่เหมาะสมแล้ว การทำงานก็จะจบลง แต่หากไม่ใช่ การทำงานก็จะดำเนินต่อไปตามตารางจัดการอบเหนียว โดยจะมีกฎเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาว่าตารางสอนใหม่ที่ได้นั้นจะนำมาใช้สำหรับกระบวนการในรอบถัดไปหรือจะนำตารางเดิมมาใช้อีกครั้ง กระบวนการก็จะดำเนินซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ตารางสอนที่เหมาะสมหรือจนกว่าจะเป็นไปตามเงื่อนไขในการหยุดทำงาน

การดำเนินการของการจำลองการอบเหนียวจำเป็นต้องคำนึงถึง ตัวแปรที่มีผลกระทบ ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้น อัตราการลดอุณหภูมิ วิธีการสร้างคำตอบใหม่ กฎเกณฑ์ในการยอมรับ ฯลฯ

```
s := GenerateInitialSolution()
T := T_0
WHILE termination conditions not met
  s' := PickAtRandom(N(s))
  IF f(s') < f(s)
    s := s'
  ELSE
    Accept s' as new solution with probability p(T,s',s)
  ENDIF
  Update(T)
ENDWHILE
```

รูปที่ 2. Simulated Annealing (Pseudo-code)

3.3 การค้นหาแบบตาบู (Tabu Search)

การค้นหาแบบตาบูหรือเรียกโดยย่อว่า “TS” ถูกนำเสนอโดย Fred Glover (49) โดยมีแนวคิดในการใช้หน่วยความจำ (Memory) ในการเก็บรายการพื้นที่ต้องห้ามในการค้นหา แต่ก็ไม่จำเป็นว่าพื้นที่นั้นจะเป็นพื้นที่ต้องห้ามตลอดไป อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและสถานะในการค้นหาได้ โดยการทำงานของการค้นหาแบบตาบู จะเริ่มจากการกำหนดจุดเริ่มต้นหรือคำตอบเริ่มต้น จากนั้นจะทำการค้นหาคำตอบใหม่ด้วยการเคลื่อนย้าย (Move) ไปยังตำแหน่งใกล้เคียง และทำการตรวจสอบว่าคำตอบใหม่ที่ได้นั้นเป็นคำตอบที่เหมาะสมหรือไม่ หากเป็นคำตอบที่เหมาะสมแล้ว กระบวนการทำงานก็จะจบลง แต่หากไม่เป็นไปตามนั้น การทำงานก็จะดำเนินต่อไป โดยนำคำตอบใหม่หรือตำแหน่งใหม่เป็นจุดเริ่มต้นและทำการเคลื่อนย้ายต่อไป โดยคำตอบใหม่ต้องเป็นคำตอบที่มีค่าความเหมาะสมมากกว่าคำตอบเดิมเท่านั้น นอกจากนี้การค้นหาแบบตาบูจะทำการเก็บคำตอบในตำแหน่งที่เคยเคลื่อนย้ายไปไว้ในรายการต้องห้าม (Taboo list) เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้มีการเคลื่อนย้ายไปยังตำแหน่งเดิม ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะดำเนินซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งคำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่เหมาะสมหรือจนกว่าจะเป็นไปตามเงื่อนไขในการหยุดทำงาน เช่น ครบจำนวนครั้งในการเคลื่อนย้าย เป็นต้น

การประยุกต์ใช้การค้นหาแบบตาบูมาช่วยแก้ปัญหาการจัดตารางสอนนั้น จะเริ่มจากการสร้างตารางสอนมาตารางหนึ่ง แล้วนำมาประเมินค่าความเหมาะสมจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สามารถตรวจสอบการละเมิดข้อบังคับต่างๆ ได้ เมื่อได้ค่าความเหมาะสมที่สามารถกำหนดได้ว่าตารางสอนนั้นมีความเหมาะสมมากน้อยเพียงไรแล้ว จะนำตารางสอนนั้นเข้าสู่กระบวนการการค้นหาแบบตาบู โดยการเคลื่อนย้ายจะหมายถึงการปรับ

เปลี่ยนเหตุการณ์ภายในตารางสอนบางส่วน ทำให้ได้ตารางสอนใหม่ขึ้นมา ซึ่งการปรับเปลี่ยนเหตุการณ์ภายในตารางสอนที่ผ่านมาจะถูกเก็บลงรายการต้องห้ามในระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นจะนำตารางสอนที่ได้มาทำการประเมินค่าความเหมาะสมเพื่อตรวจสอบดูว่าตารางสอนนั้นเป็นตารางสอนที่เหมาะสมแล้วหรือไม่ ถ้าเป็นตารางที่เหมาะสมแล้ว การทำงานก็จะจบลง แต่หากไม่ใช่ การทำงานก็จะดำเนินต่อไป โดยนำตารางสอนใหม่ที่ได้มาทำการปรับเปลี่ยนเหตุการณ์ภายในตารางบางส่วน กระบวนการก็จะดำเนินซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ตารางที่เหมาะสมหรือจนกว่าจะเป็นไปตามเงื่อนไขในการหยุดทำงาน

การดำเนินการของการค้นหาแบบตาบู จำเป็นต้องคำนึงถึง ตัวแปรที่มีผลกระทบ ได้แก่ ขนาดของรายการต้องห้าม การกำหนดบริเวณใกล้เคียง วิธีการในการเคลื่อนย้าย ฯลฯ

```
k := 1.
s := GenerateInitialSolution()
s* := s;
WHILE the termination criteria not met DO
  Identify N(s). (Neighbourhood set)
  Identify T(s,k). (Tabu set)
  Identify A(s,k). (Aspirant set)
  Choose best s' from N(s,k) = N(s)-T(s,k)+A(s,k).
  s := s'
  IF f(s') < f(s*) THEN
    s* := s'
  ENDIF
  k := k+1.
END WHILE
```

รูปที่ 3. Tabu Search (Pseudo-code)

3.4 การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณาจักรมด (Ant colony optimization)

การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณาจักรมดหรือเรียกโดยย่อว่า “ACO” ถูกนำเสนอโดย Marco Dorigo (50) โดยมีแนวคิดมาจากพฤติกรรมการออกหาอาหารของมด ซึ่งมดเหล่านี้ในขณะที่ออกเดินทางไปหาอาหารจะมีการปล่อยฟีโรโมน (Pheromone) ไว้ตามทางที่เดินผ่าน โดยมีจุดประสงค์เพื่อเป็นการบอกมดตัวอื่นๆ ว่าเส้นทางนี้เป็นเส้นทางที่เหมาะสมในการเดินทางไปหาอาหารระหว่างอาณาจักรของมันและแหล่งอาหาร ซึ่งมดตัวอื่นที่อยู่ในอาณาจักรเดียวกันก็จะเดินตามเส้นทางที่มีฟีโรโมนอยู่และก็จะปล่อยฟีโรโมนในเส้นทางนั้นด้วย ทำให้เส้นทางนั้นมีการสะสมของฟีโรโมนมากยิ่งขึ้น ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะดำเนินซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้เส้นทางที่เหมาะสม หรือจนกว่าจะเป็นไปตามเงื่อนไขในการหยุดทำงาน เช่น ครบจำนวนรอบที่กำหนดไว้เป็นต้น การประยุกต์ใช้การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณาจักรมดมาช่วยแก้ปัญหาการจัดตารางสอนนั้น จะเริ่มจากการจำลองให้มดจำนวนหนึ่งทำการสร้างตารางสอนขึ้นมาแล้วนำตารางสอนเหล่านั้นมาประเมินค่าความเหมาะสมจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สามารถตรวจสอบการละเมิดข้อบังคับต่างๆ ได้ เพื่อตรวจสอบดูว่าตารางสอนเหล่านี้เป็นตารางสอนที่เหมาะสมแล้วหรือไม่ ถ้าเป็นตารางสอนที่เหมาะสมแล้ว การทำงานก็จะจบลง แต่หากไม่ใช่ การทำงานก็จะดำเนินต่อไป โดยจะทำการกำหนดค่าฟีโรโมนให้กับแต่ละตารางสอน แล้วตรวจสอบว่าตารางสอนใดมีค่าฟีโรโมนมากที่สุดก็จะเก็บค่าเอาไว้ การทำงานในรอบต่อไปก็จะจำลองให้มดจำนวนเท่าเดิมทำการสร้างตารางสอนขึ้นมาอีก ซึ่งมดเหล่านั้นอาจจะทำการสร้างตารางสอนตามรูปแบบของตารางสอนที่มีค่าฟีโรโมนมากที่สุดในรอบก่อนหน้า กระบวนการก็จะดำเนินซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ตารางที่เหมาะสมหรือจนกว่าจะเป็นไปตามเงื่อนไขในการหยุดทำงาน

การดำเนินการของการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณาจักรมด จำเป็นต้องคำนึงถึง ตัวแปรที่มีผลกระทบ ได้แก่ จำนวนมด จำนวนรอบในการทำงาน ความเข้มข้นของฟีโรโมน อัตราการระเหยของฟีโรโมน ฯลฯ

```
WHILE termination conditions not met DO
  ScheduleActivities
    AntBasedSolutionConstruction()
    PheromoneUpdate()
    DaemonActions() {optional}
  END ScheduleActivities
ENDWHILE
```

รูปที่ 4. Ant Colony Optimization (Pseudo-code)

4. การเปรียบเทียบวิธีการและแนวทางต่างๆ ที่ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย

การแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยนั้นสามารถแก้ไขได้ด้วยวิธีการที่หลากหลาย ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งในปัจจุบันนั้นวิธีการในกลุ่มเมตาฮิวริสติกได้รับความนิยมจากนักวิจัยในการนำมาใช้แก้ปัญหานี้เพราะสามารถให้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพดี โดยวิธีการในกลุ่มเมตาฮิวริสติกที่ผู้เขียนได้อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ ซึ่งได้แก่ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม การจำลองการอบเหนียว การค้นหาแบบตาบู และการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณาจักรมด นั้น สามารถแบ่งได้เป็นประเภทหลักๆ สองประเภท คือ วิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียว และวิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นมากกว่าหนึ่งคำตอบ สำหรับแนวทางในการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยด้วยวิธีการในกลุ่มเมตาฮิวริสติกทั้งสองประเภทนั้น จะนิยมใช้แนวทางหลักๆ สองแนวทาง คือ พิจารณาข้อบังคับทีละประเภท และพิจารณาข้อบังคับทั้งสองประเภทพร้อมๆ กัน ดังนั้นการเปรียบเทียบจะนำเสนอในประเด็นต่างๆ ดังนี้

1. เปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียวและวิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นมากกว่าหนึ่งคำตอบ

ตารางที่ 3. ตารางเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียวและวิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นมากกว่าหนึ่งคำตอบ

รายการเปรียบเทียบ	วิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียว	วิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นมากกว่าหนึ่งคำตอบ
วิธีการ	1. การจำลองการอบเหนียว 2. การค้นหาแบบตาบู	1. ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม 2. การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณาจักรมด
วัตถุประสงค์	1. มุ่งเน้นในการพัฒนาคำตอบเริ่มต้น (Exploitation)	1. มุ่งเน้นในการค้นหาคำตอบในวงกว้าง (Exploration)
จุดเด่น	1. ใช้ทรัพยากรในการประมวลผลน้อย	1. ผู้ใช้มีโอกาสในการเลือกคำตอบ 2. สามารถค้นหาคำตอบในวงกว้างได้ดี
จุดด้อย	1. คำตอบที่ได้มักเป็นคำตอบที่เหมาะสมในวงแคบ 2. ผู้ใช้ไม่มีโอกาสในการเลือกคำตอบ	1. คำตอบที่ได้เมื่อสิ้นสุดการทำงานอาจเป็นคำตอบที่ยังไม่ได้รับการพัฒนาอย่างเต็มที่ 2. ใช้ทรัพยากรในการประมวลผลมาก

จากตารางที่ 3 วิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียวนั้นจะเริ่มต้นจากการสร้างคำตอบเริ่มต้นเพื่อใช้ในการแก้ปัญหามาหนึ่งคำตอบและเมื่อได้คำตอบเริ่มต้นแล้วจะค่อยๆ พัฒนาคำตอบนั้นให้มีคุณภาพมากขึ้นด้วยกระบวนการทำงานของแต่ละวิธี ส่วนวิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นมากกว่าหนึ่งคำตอบนั้นจะทำการสร้างคำตอบเริ่มต้นมาจำนวนหนึ่งเพื่อใช้ในการแก้ปัญหา โดยคำตอบเริ่มต้นที่สร้างมานั้นควรที่จะมีความหลากหลาย ซึ่งหมายความว่าคำตอบเหล่านั้นจะไม่มีความเหมือนหรือใกล้เคียงกันมากจนเกินไป จากนั้นจะค่อยๆ พัฒนาคำตอบเหล่านี้ให้มีคุณภาพที่ดีขึ้นด้วยกระบวนการทำงานของแต่ละวิธี

ซึ่งสิ่งที่ต้องคำนึงถึงหากจะเลือกใช้วิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียวคือ การใช้คำตอบเริ่มต้น

เพียงคำตอบเดียวจะส่งผลให้การค้นหาคำตอบต้องค่อยๆ ค้นหาจากคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบเริ่มต้น จึงอาจทำให้ไม่สามารถค้นหาไปถึงคำตอบอื่นๆ ที่ไม่ใกล้เคียงกับคำตอบเริ่มต้นได้ โดยอาจสรุปได้ว่าวิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียวจะมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาคุณภาพของคำตอบเริ่มต้นเป็นหลักมากกว่าที่จะค้นหาคำตอบอื่นๆ ที่ไม่ใกล้เคียงกับคำตอบเริ่มต้น (12) ส่งผลให้คำตอบที่ได้เมื่อสิ้นสุดการทำงานอาจไม่ใช่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดจริงๆ หรือเรียกคำตอบที่ได้นั้นว่าเป็นคำตอบที่เหมาะสมในวงแคบ (Local optima) สำหรับในส่วนของวิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นมากกว่าหนึ่งคำตอบนั้น หากไม่สามารถสร้างกลุ่มของคำตอบเริ่มต้นที่มีความหลากหลายได้ จะทำให้การพัฒนาคำตอบหรือการค้นหาคำตอบทำได้เพียงระดับหนึ่งเท่านั้น ซึ่งจะส่งผลให้คำตอบที่ได้เมื่อสิ้นสุดการทำงานอาจเป็นคำตอบที่ยังไม่ได้รับการพัฒนาอย่างเต็มที่

2. เปรียบเทียบระหว่างแนวทางการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยที่พิจารณาข้อบังคับทีละประเภทและพิจารณาข้อบังคับทั้งสองประเภทพร้อมๆ กัน (6,13,17,31,38)

ตารางที่ 4. ตารางเปรียบเทียบระหว่างแนวทางการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยที่พิจารณาข้อบังคับทีละประเภทและพิจารณาข้อบังคับทั้งสองประเภทพร้อมๆ กัน

รายการเปรียบเทียบ	**พิจารณาข้อบังคับทีละประเภท**	**พิจารณาข้อบังคับทั้งสองประเภทพร้อมๆ กัน**
จำนวนขั้นตอนการทำงาน	ใช้สองขั้นตอน	ใช้ขั้นตอนเดียว
วิธีการประเมินค่าตารางสอน	นับจำนวนการละเมิดข้อบังคับ หากจำนวนการละเมิดข้อบังคับน้อย แสดงถึงตารางสอนนั้นมีความเหมาะสมมาก	ให้ค่าน้ำหนักหากเกิดการละเมิดข้อบังคับ หากผลรวมของค่าน้ำหนักน้อย แสดงถึงตารางสอนนั้นมีความเหมาะสมมาก
จุดเด่น	ทำให้เกิดความยืดหยุ่นในการทำงาน เนื่องจากสามารถเลือกใช้วิธีการที่เหมาะสมกับเป้าหมายการแก้ปัญหาในแต่ละขั้นตอนได้	การแก้ปัญหาด้วยแนวทางนี้สามารถทำได้ง่าย
จุดด้อย	กระบวนการทำงานในขั้นตอนที่สองอาจทำให้เกิดการละเมิดข้อบังคับแบบเข้มงวด ซึ่งเป็นเป้าหมายของการแก้ปัญหาในขั้นตอนแรกได้	การกำหนดค่าน้ำหนักสำหรับข้อบังคับแต่ละข้อให้มีความเหมาะสมนั้นอาจทำได้ยาก
วิธีการที่เหมาะสม	วิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียว	วิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นมากกว่าหนึ่งคำตอบ

จากตารางที่ 4 แนวทางการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยโดยพิจารณาข้อบังคับทีละประเภทนั้น จะแบ่งเป็นสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกจะทำการค้นหาตารางสอนที่มีความเหมาะสมในระดับที่นำไปใช้ได้ ซึ่งจะต้องไม่ละเมิดข้อบังคับแบบเข้มงวดแม้แต่เพียงข้อเดียว จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนที่สอง ที่เน้นในส่วนของการปรับปรุงตารางสอนที่ได้จากขั้นตอนแรกให้มีคุณภาพมากยิ่งขึ้นโดยพยายามค้นหาตารางสอนที่ละเมิดข้อบังคับแบบผ่อนปรนให้น้อยที่สุดหรือไม่ละเมิดเลยหากเป็นไปได้ สำหรับการแก้ปัญหาการจัดตาราง

สอนในระดับมหาวิทยาลัยโดยพิจารณาข้อบังคับทั้งสองประเภทพร้อมๆ กัน จะสามารถทำได้ในขั้นตอนเดียว โดยใช้วิธีการให้ค่าน้ำหนักหากเกิดการละเมิดข้อบังคับ โดยเกณฑ์ในการตั้งค่าน้ำหนักนั้น จะตั้งค่าน้ำหนักของข้อบังคับแบบเข้มงวดให้มากกว่าข้อบังคับแบบผ่อนปรน และพิจารณาที่ระดับความสำคัญของข้อบังคับนั้นๆ หากมีความสำคัญมากก็จะให้ค่าน้ำหนักที่มากตามไปด้วย เป้าหมายของแนวทางนี้จึงเป็นการค้นหาตารางสอนที่มีผลรวมของค่าน้ำหนักน้อยที่สุดเพราะจะหมายถึงตารางที่ละเมิดข้อบังคับในภาพรวมน้อยที่สุดเช่นกัน

3. เปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพในการนำวิธีการต่างๆ มาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย

สำหรับเรื่องของประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยนั้น คงยากที่จะระบุได้ว่าวิธีการใดมีประสิทธิภาพดีที่สุดหรือเหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหานี้ เนื่องจากแต่ละมหาวิทยาลัยจะมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องและข้อบังคับที่แตกต่างกัน (3,5) นักวิจัยบางท่าน (6) ได้ให้ข้อคิดเห็นว่า คุณภาพของตารางสอนที่ได้จากการใช้วิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นมากกว่าหนึ่งคำตอบจะมีคุณภาพที่ด้อยกว่าการใช้วิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียว ซึ่งเป็นผลมาจากวิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นมากกว่าหนึ่งคำตอบนั้นมุ่งเน้นที่จะค้นหาคำตอบที่เหมาะสมในวงกว้างทำให้เมื่อสิ้นสุดการทำงานแล้วคำตอบที่ได้อาจเป็นคำตอบที่ยังไม่ได้รับการพัฒนาอย่างเต็มที่ซึ่งเมื่อเทียบกับวิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียวที่มุ่งเน้นในการพัฒนาคำตอบเริ่มต้นและแม้คำตอบที่ได้นั้นอาจจะเป็นคำตอบที่เหมาะสมในวงแคบก็ตาม แต่คำตอบนั้นก็อาจจะมีคุณภาพสูงได้ ซึ่งตรงกับผลการทดลอง (21) ที่รายงานว่า ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและการจำลองการอบเหนียวสามารถใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนได้เป็นอย่างดี โดยคุณภาพของตารางสอนที่ได้จากวิธีการจำลองการอบเหนียวนั้น มีคุณภาพมากกว่าการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ในส่วนของทรัพยากรในการประมวลผลนั้น วิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นมากกว่าหนึ่งคำตอบนั้นจะใช้และทรัพยากรในการประมวลมากกว่าวิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียว (6) เนื่องจากการใช้คำตอบเริ่มต้นมากกว่าหนึ่งคำตอบและการมุ่งเน้นในการค้นหาคำตอบในวงกว้าง ทำให้ต้องใช้ทรัพยากรมากกว่าการมุ่งเน้นที่การค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบเริ่มต้นเพียงคำตอบเดียว (25) แต่อย่างไรก็ตามวิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียวบางวิธีอาจใช้ระยะเวลาในการประมวลผลมาก เนื่องจากลักษณะของกระบวนการทำงานของวิธีการนั้น เช่น การจำลองการอบเหนียว ที่จำเป็นต้องค่อยๆ ทำการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ จึงจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพ ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ (21) ที่ผลการทดลองพบว่า ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมทำงานได้เร็วกว่าการจำลองการอบเหนียวถึง 54 เปอร์เซ็น

ดังนั้นผู้เขียนขอนำเสนอตารางแสดงการเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพในการนำวิธีการต่างๆ มาใช้แก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5. ตารางแสดงการเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพในการนำวิธีการต่างๆ มาใช้แก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย

งานวิจัย	GA	SA	TS	ACO	ผลการเปรียบเทียบ
Alberto Colorni, Dorigo, & Maniezzo, 1998 (51)	✓	✓	✓	-	1. การค้นหาแบบตาบูมีประสิทธิภาพดีที่สุด ส่วนขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถค้นหาตารางสอนได้ดีกว่าการจำลองการอบเหนียว 2. สำหรับในมุมมองของผู้ใช้นั้นขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม มีข้อได้เปรียบกว่าวิธีการอื่น เนื่องจากตารางสอนที่ได้มีมากกว่าหนึ่งตาราง ซึ่งทำให้ผู้ใช้มีโอกาสในการเลือกตารางที่เหมาะสมกับผู้ใช้มากที่สุดได้
Rossi-Doria et al., 2003 (5)	✓	✓	✓	✓	1. จากตัวอย่างปัญหาขนาดเล็ก การจำลองการอบเหนียวและการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณาจักรมดมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและการค้นหาแบบตาบู 2. จากตัวอย่างปัญหาขนาดกลาง การจำลองการอบเหนียวมีประสิทธิภาพมากที่สุด ตามมาด้วยการค้นหาแบบตาบูและขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ส่วนการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณาจักรมดมีประสิทธิภาพต่ำที่สุด 3. จากตัวอย่างปัญหาขนาดใหญ่ หากมองในมุมของความสามารถในการค้นหาตารางสอนนั้น การค้นหาแบบตาบูสามารถค้นหาตารางสอนได้ดีที่สุด แต่หากมองในมุมของคุณภาพของตารางสอนแล้ว การหาค่าความเหมาะสมที่สุดด้วยอาณาจักรมดและขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะสามารถค้นหาตารางสอนที่มีคุณภาพได้มากกว่าการค้นหาแบบตาบู ส่วนการจำลองการอบเหนียวนั้น ไม่สามารถค้นหาตารางสอนในตัวอย่างปัญหาขนาดใหญ่ได้เลย
Socha et al., 2003 (7)	-	✓	-	✓	1. จากตัวอย่างปัญหาขนาดกลางการจำลองการอบเหนียวมีประสิทธิภาพดีกว่าการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณาจักรมด 2. จากตัวอย่างปัญหาขนาดใหญ่การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณาจักรมดกลับมีประสิทธิภาพดีกว่าการจำลองการอบเหนียว
P. Pongcharoen et al., 2008 (21)	✓	✓	-	-	1. ในมุมของคุณภาพนั้น ตารางสอนที่ได้จากวิธีการจำลองการอบเหนียวมีคุณภาพมากกว่าตารางสอนที่ได้จากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม 2. ในมุมของความเร็วนั้น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมทำงานได้เร็วกว่าการจำลองการอบเหนียวถึง 54 เปอร์เซ็น
Juan Frausto-Solís et al., 2008 (40)	✓	✓	-	-	1. การจำลองการอบเหนียวสามารถค้นหาตารางสอนที่สามารถนำไปใช้ได้ (Feasible Timetable) ได้ดีกว่าขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม
Yang & Jat, 2011 (6)	✓	-	✓	-	1. จากตัวอย่างปัญหาขนาดเล็ก ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการค้นหาแบบตาบู 2. จากตัวอย่างปัญหาขนาดกลาง การค้นหาแบบตาบูจะมีประสิทธิภาพมากกว่าขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

จากตารางที่ 5 จะเห็นว่าผลการทดลองนั้นมีความขัดแย้งกันบ้างสอดคล้องกันบ้าง การเปรียบเทียบวิธีการต่างๆ ที่นำมาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยว่าวิธีการใดเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดนั้น จึงไม่สามารถสรุปได้ชัดเจนหากทดสอบกับปัญหาที่แตกต่างกัน แต่ก็พอที่จะพิจารณาจุดเด่นของแต่ละวิธีได้ ดังนี้

1. การค้นหาแบบตาบูสามารถค้นหาคำตอบได้รวดเร็วและมีอัตราในการค้นหาคำตอบได้สำเร็จค่อนข้างสูง

2. ในปัญหาขนาดเล็กและขนาดกลาง การจำลองการอบเหนียวสามารถค้นหาคำตอบที่มีคุณภาพสูงได้ดี

3. ในปัญหาขนาดใหญ่ การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณาจักรมดสามารถค้นหาคำตอบที่มีคุณภาพสูงได้ดี

4. ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนิยมนำไปใช้ผสมผสานกับวิธีการอื่นๆ และสามารถค้นหาคำตอบที่มีคุณภาพสูงได้ดี

5. ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณาจักรมดสามารถช่วยให้ผู้ใช้มีโอกาสในการเลือกตารางที่เหมาะสมกับผู้ใช้มากที่สุดได้ เนื่องจากแต่ละวิธีการมีจุดเด่นที่แตกต่างกันไป ทำให้ในปัจจุบันการนำวิธีการต่างๆ มาผสมผสานกันเพื่อใช้แก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากคำตอบที่ได้จากการผสมผสานวิธีการต่างๆ เข้าด้วยกันนั้นจะมีคุณภาพดีกว่าการใช้วิธีการเดียว (2,6,30,52,53) อย่างไรก็ตามการผสมผสานวิธีการต่างๆ นั้น แม้จะทำให้ได้รับคำตอบที่ดีขึ้น แต่ก็ต้องแลกด้วยการใช้ทรัพยากรในการประมวลที่มากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน โดยตารางที่ 6 จะแสดงงานวิจัยที่มีการผสมผสานวิธีการต่างๆ ในกลุ่มเมตาฮิวริสติกที่นำมาใช้แก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6. ตารางแสดงวิธีการแบบผสมผสานที่นำมาใช้แก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย

งานวิจัย	GA	SA	TS	ACO
X. Wang & Ruan, 2009 (54)	●		●	
Ayob & Jaradat, 2009 (2)		●		●
Ayob & Jaradat, 2009 (2)			●	●
J. Frausto-Solís & Alonso-Pecina, 2008 (55)		●	●	
Rahoual & Saad, 2006 (53)	●		●	

จากตารางที่ 6 งานวิจัยส่วนใหญ่จะทำการผสมผสานวิธีการคนละประเภทกันซึ่งน่าจะเป็นเพราะนักวิจัยต้องการนำจุดเด่นของวิธีการแต่ละประเภทมาใช้และเพื่อช่วยให้เกิดความสมดุลระหว่างการพัฒนาคุณภาพของคำตอบเริ่มต้นและการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมในวงกว้าง เนื่องจากจะช่วยให้คำตอบที่ได้มีคุณภาพสูง (12) ซึ่งนอกจากการผสมผสานวิธีการต่างๆ ในกลุ่มเมตาฮิวริสติกแล้ว ยังมีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่นิยมทำการผสมผสานวิธีการในกลุ่มเมตาฮิวริสติกกับการค้นหาเฉพาะที่ (Local Search) (6,30,52) เนื่องจากการค้นหาเฉพาะที่นั้น เป็นวิธีการค้นหาที่ค่อนข้างได้รับความนิยมในการนำไปใช้ผสมผสานกับวิธีการอื่นๆ ในการแก้ปัญหาที่ต้องการหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยในงานวิจัยของ (25) ได้เขียนไว้ว่าวิธีการต่างๆ ในกลุ่มเมตาฮิวริสติกนั้นควรจะผสมผสานกับการค้นหาเฉพาะที่เพราะจะช่วยให้ได้รับคำตอบที่ดีขึ้น แต่จากที่ผู้เขียนได้ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมานั้น พบว่ามีเพียงขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเท่านั้นที่ได้รับความนิยมในการนำไปใช้ผสมผสานกับการค้นหาเฉพาะที่ส่วนวิธีการอื่นๆ ในกลุ่มเมตาฮิวริสติกนั้นยังไม่ได้รับความนิยมมากนัก ซึ่งอาจเป็นเพราะวิธีการในกลุ่มเมตาฮิวริสติก เช่น การจำลองการอบเหนียวและการค้นหาแบบตาบูนั้นได้รับการพัฒนามาจากการค้นหาเฉพาะที่นั่นเอง

5. การอภิปราย

งานวิจัยเกี่ยวกับการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยนั้น ส่วนใหญ่ผู้วิจัยจะเลือกทำกับปัญหาที่เกิดขึ้นกับมหาวิทยาลัยที่ตนเองสังกัดอยู่ เพราะจะสามารถศึกษาปัจจัยและข้อบังคับต่างๆ ได้ง่าย และผู้วิจัยก็มักจะเลือกใช้วิธีการใดวิธีการหนึ่งในการแก้ไขปัญหา เนื่องจากผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์เพียงเพื่อที่จะพัฒนาระบบที่สามารถช่วยในการจัดตารางสอนให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าและใช้เวลาน้อยกว่าการจัดตารางสอนด้วยวิธีการปกติเท่านั้น ทำให้การวิจัยเพื่อเปรียบเทียบวิธีการต่างๆ ที่นำมาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยมีไม่มากนัก สำหรับวิธีการที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้แก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย คือวิธีการที่จัดอยู่ในกลุ่มเมตาฮิวริสติก ซึ่งได้แก่ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม การจำลองการอบเหนียว การค้นหาแบบตาบู และการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณาจักรมด โดยวิธีการเหล่านี้สามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่ม คือ วิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียว ซึ่งประกอบด้วยการจำลองการอบเหนียวและการค้นหาแบบตาบู ส่วนวิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นมากกว่าหนึ่งคำตอบจะประกอบด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณาจักรมด สำหรับแนวทางในการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยด้วยวิธีการในกลุ่มเมตาฮิวริสติกทั้งสองประเภทนั้น จะนิยมใช้แนวทางหลักๆ สองแนวทาง คือ พิจารณาข้อบังคับทีละประเภท และพิจารณาข้อบังคับทั้งสองประเภทพร้อมๆ กัน

โดยการเลือกใช้วิธีการแต่ละประเภทมาใช้ร่วมกับแนวทางในการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยนั้น หากพิจารณาในส่วนของวัตถุประสงค์ในการทำงานของวิธีการแต่ละประเภทนั้น วิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียวจะเหมาะสมกับแนวทางการแก้ปัญหาแบบที่พิจารณาข้อบังคับทีละประเภท เนื่องจากวิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียวจะมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาคุณภาพของคำตอบเริ่มต้นเป็นหลัก ซึ่งการพิจารณาข้อบังคับทีละประเภทนั้นจะช่วยให้สามารถกำหนดเป้าหมายในการแก้ปัญหาได้ง่าย ทำให้วิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียวสามารถพัฒนาคุณภาพของคำตอบเริ่มต้นได้ดี ส่วนวิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นมากกว่าหนึ่งคำตอบนั้นจะเหมาะสมกับแนวทางการแก้ปัญหาแบบที่พิจารณาข้อบังคับทั้งสองประเภทพร้อมๆ กัน เนื่องจาก วิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นมากกว่าหนึ่งคำตอบจะมุ่งเน้นไปที่การค้นหาคำตอบที่เหมาะสมในวงกว้างเป็นหลัก ซึ่งการพิจารณาข้อบังคับทั้งสองประเภทพร้อมๆ กัน ก็จะมีลักษณะเดียวกับการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมในวงกว้างนั่นเอง

แต่การนำวิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นมากกว่าหนึ่งคำตอบมาใช้กับแนวทางในการแก้ปัญหาที่พิจารณาข้อบังคับทีละประเภทนั้น จะมีข้อดีในส่วนของการแก้ปัญหาการละเมิดข้อบังคับแบบเข้มงวดที่อาจเกิดขึ้นในขั้นตอนที่สอง เพราะจะทำให้มีทางเลือกในการแก้ปัญหามากขึ้น กล่าวคือ สามารถที่จะเลือกทิ้งคำตอบที่ละเมิดข้อบังคับแบบเข้มงวดนั้นได้ ซึ่งหากใช้วิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียวจะมีเพียงทางเลือกเดียวในการแก้ปัญหานี้ คือ ต้องทำการแก้ไขคำตอบนั้นให้ไม่ละเมิดข้อบังคับแบบเข้มงวด

สำหรับการนำวิธีการแบบผสมผสานมาใช้นั้นจะเหมาะกับแนวทางการแก้ปัญหาที่พิจารณาข้อบังคับทีละประเภท เนื่องจากแนวทางนี้แบ่งเป็นสองขั้นตอน จึงสามารถใช้วิธีการหนึ่งในการค้นหาตารางสอนที่มีความเหมาะสมในระดับที่นำไปใช้ได้ และใช้อีกวิธีการหนึ่งในการพัฒนาคุณภาพของตารางสอนที่ได้จากขั้นตอนแรก แต่ก็จะทำให้เกิดคำถามตามมา คือ วิธีการที่นำมาผสมผสานควรเป็นวิธีการประเภทเดียวกันหรือไม่ ในคำถามนี้ผู้เขียนมีความเห็นว่า การใช้วิธีการประเภทเดียวกันนั้น ไม่ว่าจะเป็นวิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียวหรือวิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นมากกว่าหนึ่งคำตอบ จะช่วยให้สามารถผสมผสานวิธีการเหล่านั้นได้ง่ายเพราะเป็นวิธีการในประเภทเดียวกัน แต่การผสมผสานวิธีการในลักษณะนี้ไม่ว่าจะใช้วิธีการใดในขั้นตอนใดก็ตาม อาจส่งผลให้คุณภาพของคำตอบที่ได้ไม่ดีเท่าที่ควรเนื่องจากวิธีการประเภทเดียวกันจะมุ่งเน้นในการค้นหาคำตอบในลักษณะเดียวกัน ทำให้ไม่เกิดความสมดุลระหว่างการพัฒนาคุณภาพของคำตอบเริ่มต้นและการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมในวงกว้าง ดังนั้นจึงควรจะผสมผสานวิธีการ

คนละประเภทกันมากกว่าผสมผสานวิธีการในประเภทเดียวกัน ซึ่งการผสมผสานวิธีการคนละประเภทกันนั้นก็จะเกิดคำถามตามมาอีกเช่นกันว่า ควรจะใช้วิธีการประเภทไหนในขั้นตอนใด ซึ่งการเลือกว่าวิธีการประเภทไหนควรอยู่ในขั้นตอนใดนั้น คงต้องพิจารณาถึงเป้าหมายของการทำงานในแต่ละขั้นตอนรวมไปถึงความต่อเนื่องของวิธีการแต่ละประเภทที่จะนำมาใช้ เนื่องจากคำตอบเริ่มต้นที่ต้องใช้ในวิธีการแต่ละประเภทมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน

ซึ่งผู้เขียนมีความคิดเห็นว่าควรใช้วิธีการประเภทที่ใช้คำตอบเริ่มต้นมากกว่าหนึ่งคำตอบในขั้นตอนแรกแล้วจึงใช้วิธีการประเภทที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียวในขั้นตอนที่สอง เหตุผลคือ การใช้วิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นมากกว่าหนึ่งคำตอบในขั้นตอนแรกนั้น จะมุ่งเน้นที่การค้นหาคำตอบที่เหมาะสมในวงกว้าง โดยคำตอบที่ได้นั้นจะมีความหลากหลายแต่อาจจะยังไม่ได้รับการพัฒนาที่มากนัก ซึ่งน่าจะสอดคล้องกับเป้าหมายของการแก้ปัญหาในขั้นตอนนี้ที่ต้องการค้นหาเพียงตารางสอนที่ไม่ละเมิดข้อบังคับแบบเข้มงวด และเมื่อนำคำตอบที่ได้ไปใช้ในขั้นตอนที่สองซึ่งมีเป้าหมายในการค้นหาตารางสอนที่ละเมิดข้อบังคับแบบผ่อนปรนให้น้อยที่สุดหรือไม่ละเมิดเลยหากเป็นไปได้ ทำให้วิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียวน่าจะเหมาะสมกับขั้นตอนนี้มากกว่า เพราะวิธีการนี้จะเน้นในการพัฒนาคุณภาพของคำตอบเริ่มต้นและช่วยให้คำตอบที่ได้มีคุณภาพสูงซึ่งจะหมายถึงตารางสอนที่ละเมิดข้อบังคับในจำนวนที่น้อยนั่นเอง และแม้คำตอบที่ได้จากวิธีการประเภทนี้อาจจะเป็นคำตอบที่เหมาะสมในวงแคบก็ตาม แต่สุดท้ายแล้วเมื่อสิ้นสุดการทำงานคำตอบที่ได้นั้นอาจเป็นคำตอบที่มีคุณภาพสูงได้ เนื่องจากคำตอบเริ่มต้นในขั้นตอนนี้จะได้มาจากวิธีการประเภทที่ใช้คำตอบเริ่มต้นมากกว่าหนึ่งคำตอบทำให้คำตอบเริ่มต้นสำหรับขั้นตอนนี้มีจำนวนมากและมีความหลากหลาย จึงสามารถใช้วิธีการประเภทที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียวในการพัฒนาคุณภาพของคำตอบแต่ละคำตอบได้ ซึ่งก็น่าจะช่วยให้ได้คำตอบที่มีคุณภาพมาจำนวนหนึ่งและคำตอบบางคำตอบนั้นอาจเป็นคำตอบที่มีคุณภาพสูงและเป็นคำตอบที่เหมาะสมในวงกว้างก็ได้

ในส่วนของชุดข้อมูลทดสอบนั้น ผู้เขียนมีความเห็นว่าเป็นอีกประเด็นหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากการเปรียบเทียบวิธีการต่างๆ นั้นหากทดลองกับข้อมูลทดสอบเพียงชุดเดียวก็อาจไม่ได้รับความน่าเชื่อถือครั้นจะทดสอบกับข้อมูลทดสอบชุดอื่นๆ ก็หาได้ไม่ง่ายนัก นอกจากนี้ข้อมูลทดสอบแต่ละชุดก็มีความแตกต่างกันทั้งในเรื่องของปัจจัยที่เกี่ยวข้องและข้อบังคับต่างๆ ทำให้วิธีการที่สามารถใช้แก้ปัญหาได้ดีกับข้อมูลทดสอบชุดหนึ่งอาจไม่สามารถใช้แก้ปัญหาได้ดีกับข้อมูลทดสอบชุดอื่นๆ ก็ได้ ซึ่งในปัจจุบันนั้นชุดข้อมูลทดสอบที่ได้รับเผยแพร่สำหรับใช้ในการวิจัยเกี่ยวกับการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยนั้นยังมีอยู่ไม่มากนัก ซึ่งแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7. ตารางแสดงชุดข้อมูลทดสอบที่ได้รับการเผยแพร่

ชุดข้อมูลทดสอบ	ปีที่นำเสนอ	ประเภท	ข้อมูลเพิ่มเติม
ITC 2007	2007	PE-CTT	http://www.cs.qub.ac.uk/itc2007/
Lewis & Paechter	2005	PE-CTT	http://www.soc.napier.ac.uk/~benp/centre/timetabling/harderinstances
ITC 2002	2002	PE-CTT	http://www.idsia.ch/Files/ttcomp2002/
Metaheuristics Network	2001	PE-CTT	http://iridia.ulb.ac.be/supp/IridiaSupp2002-001/
ITC 2007	2007	CB-CTT	http://www.cs.qub.ac.uk/itc2007/
Alex Bonutti, Fabio De Cesco, Luca Di Gaspero and Andrea Schaerf	2008	CB-CTT	http://dx.doi.org/10.1007/s10479-010-0707-0

ชุดข้อมูลทดสอบบางชุดนั้นอาจมีการกำหนดความซับซ้อนของปัญหา โดยอาจจะกำหนดตามขนาดของปัญหา เช่น เล็ก กลาง และใหญ่ หรือกำหนดตามความยากง่ายของปัญหา เช่น ง่าย ปานกลาง และยาก ซึ่งในความคิดเห็นของผู้เขียนแล้วหากจะกำหนดความซับซ้อนของปัญหา น่าจะกำหนดตามความยากง่ายของปัญหาเนื่องจากบางปัญหาที่มีขนาดใหญ่อาจจะสามารถแก้ไขได้ง่ายก็เป็นไปได้ เช่นเดียวกันปัญหาขนาดเล็กบางปัญหาอาจจะแก้ไขได้ยากก็เป็นไปได้ ซึ่งหากมีการกำหนดระดับความซับซ้อนให้กับชุดข้อมูลทดสอบที่เป็นมาตรฐานเดียวกันและมีการนำชุดข้อมูลทดสอบที่กำหนดระดับความซับซ้อนนั้นไปใช้ในการทดลองเกี่ยวกับแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยด้วยวิธีการต่างๆ ก็จะทำให้สามารถที่จะสรุปผลการทดลองจากงานวิจัยต่างๆ ได้ในเบื้องต้นว่า วิธีการใดเหมาะสมที่จะใช้แก้ปัญหาการจัดตารางสอนที่มีความซับซ้อนในระดับใด เพื่อที่จะช่วยให้นักวิจัยสามารถเลือกใช้วิธีการได้เหมาะสมกับความซับซ้อนของปัญหา และช่วยให้งานวิจัยที่ผ่านมาสามารถใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในชีวิตจริงได้ ที่ผู้เขียนกล่าวเช่นนี้นั้นเป็นเพราะมีคำกล่าวที่ว่า “งานวิจัยที่ประสบความสำเร็จนั้นอาจไม่ประสบความสำเร็จในการนำไปใช้กับปัญหาที่เกิดขึ้นในชีวิตจริง” ซึ่งข้อความนี้ได้รับความสนใจจาก Barry McCollum (56) ซึ่งเขาได้เขียนบทความในหัวข้อ “University timetabling: Bridging the Gap between Research and Practice” โดยวัตถุประสงค์ของบทความนี้คือเพื่อลดช่องว่างระหว่างงานวิจัยด้านการจัดตารางสอนกับความต้องการของสถาบันการศึกษา โดยในบทความนี้เขียนถึงคำพูดของกลุ่ม “Metaheuristic network” ที่ทำการทดลองโดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบที่สร้างขึ้นเอง ซึ่งสรุปได้ว่า “ชุดข้อมูลทดสอบจากปัญหาที่พวกเขากำลังศึกษาอยู่นั้นค่อนข้างใกล้เคียงกับปัญหาที่พบในชีวิตจริงแต่จะไม่ซับซ้อนมากนัก ซึ่งพวกเขาก็ไม่ค่อยมีความสุขมากนักที่ต้องใช้ชุดข้อมูลทดสอบนี้ในการทดลอง แต่ด้วยเหตุผลสองประการคือ เหตุผลแรกพวกเขาต้องการที่จะเห็นการทำงานที่เกิดขึ้นจากวิธีการที่พวกเขาออกแบบได้อย่างชัดเจน เหตุผลที่สองคือ หากพวกเขาใช้ข้อมูลทดสอบที่ได้จากปัญหาที่เกิดขึ้นในชีวิตจริงนั้นจะทำให้ปัญหามีความซับซ้อนจนเกินไปเพราะมีข้อบังคับทั้งแบบเข้มงวดและแบบผ่อนปรนเป็นจำนวนมากทำให้ต้องใช้ระยะเวลานานในการเขียนโปรแกรมและทำการทดลอง” ซึ่งจากข้อมูลข้างต้นนี้ ในมุมมองของผู้เขียนเห็นว่า ชุดข้อมูลทดสอบนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการทำวิจัยเกี่ยวกับการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัย และหากชุดข้อมูลทดสอบนั้นเป็นชุดข้อมูลทดสอบที่ได้มาจากปัญหาที่เกิดขึ้นในชีวิตจริง ก็น่าจะช่วยลดช่องว่างระหว่างปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยกับปัญหาที่เกิดขึ้นในชีวิตจริงได้ และอาจทำให้งานวิจัยที่ประสบความสำเร็จนั้นสามารถนำมาใช้กับปัญหาที่เกิดขึ้นในชีวิตจริงได้เป็นอย่างดี โดยชุดข้อมูลทดสอบที่ได้มาจากปัญหาที่เกิดขึ้นในชีวิตจริงนั้น อาจสร้างจากการจัดกลุ่มของข้อบังคับแบบเข้มงวดและข้อบังคับแบบผ่อนปรนจากปัญหาที่เกิดขึ้นในชีวิตจริงหลายๆ ปัญหา และกำหนดความซับซ้อนของปัญหาจากปัจจัยที่เกี่ยวข้อง โดยอาจจะลดความซับซ้อนของปัญหาลงมาบ้างเพื่อที่นักวิจัยจะสามารถทำการทดลองได้ง่ายขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการสร้างชุดข้อมูลทดสอบดังที่กล่าวมา คงทำได้ไม่ง่ายนักหากงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่นั้น ไม่มีการเปิดเผยข้อมูลของปัจจัยและข้อบังคับต่างๆ ละเอียดพอ

6. สรุป

สำหรับการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยนั้น การค้นหาตารางสอนที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปใช้จะหมายถึงตารางสอนที่ไม่ละเมิดข้อบังคับแบบเข้มงวดแม้เพียงข้อเดียวและควรจะละเมิดข้อบังคับแบบผ่อนปรนให้น้อยที่สุด หรือไม่ละเมิดข้อบังคับแบบผ่อนปรนเลยหากเป็นไปได้ ซึ่งการนำวิธีการและแนวทางต่างๆ ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นมาใช้ในการแก้ปัญหานี้ ในส่วนของผู้เขียนนั้นมีความเห็นว่าการผสมผสานวิธีการต่างๆ เข้าด้วยกันเพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหาการจัดตารางสอนนั้น น่าจะช่วยให้ได้คำตอบที่มีคุณภาพมากกว่าการใช้วิธีการเดียว แม้จะต้องใช้เวลาและทรัพยากรในการประมวลผลมากขึ้นก็ตาม เพราะสุดท้าย

แล้ว คำตอบหรือตารางสอนที่ได้ คือสิ่งที่สำคัญที่สุด โดยการใช้วิธีการแบบผสมผสานนั้นจะเหมาะกับแนวทางการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยที่พิจารณาข้อบังคับทีละประเภท โดยในขั้นตอนแรกควรเลือกใช้วิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นมากกว่าหนึ่งคำตอบ และในขั้นตอนที่สองควรเลือกใช้วิธีการที่ใช้คำตอบเริ่มต้นคำตอบเดียว เพราะจะช่วยให้เกิดความสมดุลระหว่างการพัฒนาคุณภาพของคำตอบเริ่มและการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมในวงกว้างได้ อีกทั้งยังมีความเหมาะสมกับเป้าหมายและกระบวนการในการแก้ปัญหาของแต่ละขั้นตอน ซึ่งน่าจะช่วยให้คำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่มีคุณภาพสูงและอาจเป็นคำตอบที่เหมาะสมในวงกว้างก็ได้

ดังนั้นการออกแบบวิธีการแบบผสมผสานสำหรับใช้แก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยนั้น จึงควรคำนึงถึงความสมดุลระหว่างการพัฒนาคุณภาพของคำตอบเริ่มและการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมในวงกว้าง เพื่อช่วยให้วิธีการแบบผสมผสานที่พัฒนาขึ้น สามารถใช้ในการค้นหาตารางสอนที่มีคุณภาพสูงและมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานได้มากที่สุด สำหรับวิธีการแบบผสมผสานนั้น นอกจากการผสมผสานวิธีการต่างๆ ในรูปแบบที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว การผสมผสานวิธีการนั้น อาจนำวิธีการหนึ่งมาใช้ภายในกระบวนการทำงานของอีกวิธีการหนึ่งก็ได้ ซึ่งผู้เขียนคาดว่าอาจจะเป็นวิธีการผสมผสานอีกรูปแบบหนึ่งที่น่าสนใจ และอาจให้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพสูง อีกทั้งหากใช้วิธีการผสมผสานในลักษณะนี้จะช่วยให้สามารถเลือกใช้แนวทางการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยแบบที่พิจารณาข้อบังคับทั้งสองประเภทพร้อมๆ กันได้

สำหรับทิศทางของงานวิจัยในอนาคตที่เกี่ยวกับการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนในระดับมหาวิทยาลัยด้วยเมตาฮิวริสติกนั้น ยังมีอยู่หลากหลายแนวทางไม่ว่าจะเป็น การผสมผสานวิธีการต่างๆ เข้าด้วยกันเพื่อใช้ในการแก้ปัญหา การศึกษาและทำการทดลองเกี่ยวกับการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแต่ละวิธีการ การคิดค้นเทคนิคใหม่เพื่อนำมาใช้กับวิธีการต่างๆ ตลอดจนการวิจัยเพื่อพัฒนาระบบจัดตารางสอนอัตโนมัติที่สามารถใช้การแก้ปัญหาการจัดตารางสอนที่มีรูปแบบแตกต่างกันได้ เป็นต้น

7. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิชาการปริทรรศน์นี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

8. เอกสารอ้างอิง

(1) Wren A. Scheduling, timetabling and rostering — A special relationship? In: Burke E, Ross P, editors. Practice and Theory of Automated Timetabling. Springer Berlin / Heidelberg; 1996. p. 46–75.

(2) Ayob M, Jaradat G. Hybrid Ant Colony systems for course timetabling problems. IEEE; 2009. P. 120–6.

(3) Lewis R. A survey of metaheuristic-based techniques for University Timetabling problems. OR Spectrum. 2007 Jul;30(1):167–90.

(4) Pongcharoen P, Hicks C, Braiden PM, Stewardson DJ. Determining optimum Genetic Algorithm parameters for scheduling the manufacturing and assembly of complex products. International Journal of Production Economics. 2002 Aug 11;78(3):311–22.

(5) Rossi-Doria O, Sampels M, Birattari M, Chiarandini M, Dorigo M, Gambardella LM, et al. A Comparison of the Performance of Different Metaheuristics on the Timetabling Problem. In: Burke E, Causmaecker P, editors. Practice and Theory of Automated Timetabling IV. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2003.

p. 329–51.

(6) Yang S, Jat SN. Genetic Algorithms With Guided and Local Search Strategies for University Course Timetabling. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews. 2011 Jan;41(1):93–106.

(7) Socha K, Sampels M, Manfrin M. Ant Algorithms for the University Course Timetabling Problem with Regard to the State-of-the-Art. In: Cagnoni S, Johnson CG, Cardalda JJR, Marchiori E, Corne DW, Meyer J-A, et al., editors. Applications of Evolutionary Computing. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2003. P. 334–45.

(8) Tuga M, Berretta R, Mendes A. A Hybrid Simulated Annealing with Kempe Chain Neighborhood for the University Timetabling Problem. IEEE; 2007. P. 400–5.

(9) International Timetabling Competition. Competition Tracks [Internet]. 2007 [cited 2011 Aug 31]. Available from: http://www.cs.qub.ac.uk/itc2007/index_files/competitiontracks.htm

(10) Burke EK, McCollum B, Meisels A, Petrovic S, Qu R. A graph-based hyper-heuristic for educational timetabling problems. European Journal of Operational Research. 2007 Jan 1;176(1):177–92.

(11) Legierski W. Constraint-based reasoning for timetabling. Artificial Intelligence Method: AI-METH, Gliwice, Poland. 2002;

(12) Al-Betar MA, Khader AT. A harmony search algorithm for university course timetabling. Ann Oper Res. 2010 Jul;

(13) Kazarlis S, Petridis V, Fragkou P. Solving University Timetabling Problems Using Advanced Genetic Algorithms. Thessaloniki, Greece; 2005. p. 131–6. Available from: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.130.7392

(14) Lü Z, Hao J-K. Adaptive Tabu Search for course timetabling. European Journal of Operational Research. 2010 Jan 1;200(1):235–44.

(15) Thanh ND. Solving Timetabling Problem Using Genetic and Heuristic Algorithms. IEEE; 2007. P. 472–7.

(16) Burke EK, Petrovic S. Recent research directions in automated timetabling. European Journal of Operational Research. 2002 Jul 16;140(2):266–80.

(17) Aladag CH, Hocaoglu G, Basaran MA. The effect of neighborhood structures on tabu search algorithm in solving course timetabling problem. Expert Systems with Applications. 2009 Dec;36(10):12349–56.

(18) Alvarez-Valdes R, Crespo E, Tamarit JM. Design and implementation of a course scheduling system using Tabu Search. European Journal of Operational Research. 2002 Mar 16;137(3):512–23.

(19) Ceschia S, Di Gaspero L, Schaerf A. Design, Engineering, and Experimental Analysis of a Simulated Annealing Approach to the Post-Enrolment Course Timetabling Problem. 1104.2518. 2011 Apr 13;

(20) Chaudhuri A, Kajal D. Fuzzy Genetic Heuristic for University Course Timetable Problem. Int. J. Advance. Soft Computing. Applications. 2010;2(1).

(21) Pongcharoen P, Promtet W, Yenradee P, Hicks C. Stochastic Optimisation Timetabling Tool for university course scheduling. International Journal of Production Economics. 2008 Apr;112(2):903–18.

(22) Rubio JM, Johnson F, Crawford B. ACO Hypercube Framework for Solving a University

Course Timetabling Problem. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. 2008;1.

(23) Mayer A, Nothegger C, Chwatal A, Raidl GR. Solving the post enrolment course timetabling problem by ant colony optimization. 2008.

(24) Abdullah S, Hamdan AR. A Hybrid Approach for University Course Timetabling. IJCSNS. 2008;8(8):127.

(25) Chiarandini M, Birattari M, Socha K, Rossi-Doria O. An effective hybrid algorithm for university course timetabling. J. of Scheduling. 2006 Oct;9(5):403–32.

(26) Bai R, Burke EK, Kendall G, Mccollum B. A simulated annealing hyper-heuristic for university course timetabling. 2006. P. 345–50.

(27) de Werra D. An introduction to timetabling. European Journal of Operational Research. 1985 Feb;19(2):151–62.

(28) Brailsford SC, Potts CN, Smith BM. Constraint satisfaction problems: Algorithms and applications. European Journal of Operational Research. 1999 Dec 16;119(3):557–81.

(29) Norberciak M. Universal method for timetable construction based on evolutionary approach. International Journal of Applied Mathematics and Computer Sciences. 2006;3(3).

(30) Abdullah S, Turabieh H. Generating University Course Timetable Using Genetic Algorithms and Local Search. IEEE Computer Society; 2008 [cited 2011 Jul 28]. p. 254–60. Available from: http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1471603.1471698

(31) Ghaemi S, Vakili MT, Aghagolzadeh A. Using a genetic algorithm optimizer tool to solve University timetable scheduling problem. IEEE; 2007. p. 1–4.

(32) Jain A, Jain S, Chande PK. Formulation of Genetic Algorithm to Generate Good Quality Course Timetable. International Journal of Innovation, Management and Technology. 2010;1(3).

(33) Lewis R, Paechter B. Application of the Grouping Genetic Algorithm to University Course Timetabling. In: Raidl GR, Gottlieb J, editors. Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2005. P. 144–53.

(34) Sigl B, Golub M, Mornar V. Solving timetable scheduling problem using genetic algorithms. IEEE; 2003. P. 519– 24.

(35) Sultan AB., Mahmod R, Sulaiman MN, Abu Bakar MR. Maintaining diversity for genetic algorithm: a case of timetabling problem. J. Teknol. 2006;44:123–30.

(36) Wang Z, Liu J, Yu X. Self-fertilization based genetic algorithm for university timetabling problem. Shanghai, China: ACM; 2009. P. 1001–4.

(37) Suyanto. An informed genetic algorithm for university course and student timetabling problems. Zakopane, Poland: Springer-Verlag; 2010 [cited 2011 Jul 28]. p. 229–36. Available from: http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1876119.1876149

(38) Aycan E, Ayav T. Solving the Course Scheduling Problem Using Simulated Annealing. IEEE; 2009. P. 462–6.

(39) Chainate W, Thapatsuwan P, Pongcharoen P. Investigation on Cooling Schemes and Parameters of Simulated Annealing for Timetabling University Courses. IEEE Computer Society; 2008 [cited 2011 Jul 28]. p. 200–4. Available from: http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1490297.1490360

(40) Frausto-Solís J, Alonso-Pecina F, Mora-Vargas J. An Efficient Simulated Annealing Algorithm for Feasible Solutions of Course Timetabling. In: Gelbukh A, Morales EF, editors. MICAI 2008: Advances in Artificial Intelligence. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2008. P. 675–85.

(41) Nandhini M, Kanmani S. A Survey of Simulated Annealing Methodology for University Course Timetabling. International Journal of Recent Trends in Engineering. 2009;1:255–7.

(42) Aladag CH, Hocaoglu G. A tabu search algorithm to solve a course timetabling problem. Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics. 2007;36(1):53–64.

(43) Minh KNTT, Thanh NDT, Trang KT, Hue NTT. Using Tabu Search for Solving a High School Timetabling Problem. In: Nguyen NT, Katarzyniak R, Chen S-M, editors. Advances in Intelligent Information and Database Systems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2010. P. 305–13.

(44) Mushi AR. Tabu search heuristic for university course timetabling problem. African Journal of Science and Technology. 2006;7(1).

(45) Matijaš VD, Molnar G, Čupić M, Jakobović D, Bašić BD. University course timetabling using ACO: a case study on laboratory exercises. Cardiff, UK: Springer-Verlag; 2010 [cited 2011 Jul 28]. p. 100–10. Available from: http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1893893.1893909

(46) Irene SFH, Deris S, Zaiton MHS. A Study on PSO-Based University Course Timetabling Problem. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society; 2009. P. 648–51.

(47) Goldberg DE. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. 1st ed. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.; 1989.

(48) Kirkpatrick S, Gelatt CD, Vecchi MP. Optimization by Simulated Annealing. Science. 1983 May 13;220(4598):671 –680.

(49) Glover F. Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence. 1986;

(50) Dorigo M, Maniezzo V, Colorni A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics. 1996 Feb;26(1):29–41.

(51) Colorni A, Dorigo M, Maniezzo V. Metaheuristics for High School Timetabling. Comput. Optim. Appl. 1998 Mar;9(3):275–98.

(52) Massoodian S, Esteki A. A Hybrid Genetic Algorithm for Curriculum Based Course Timetabling. February; 2008.

(53) Rahoual M, Saad R. Solving timetabling problems by hybridizing genetic algorithms and tabu search. Burke and Rudová (2006). 2006;467–72.

(54) Wang X, Ruan Q. Genetic Algorithm and Tabu Search Hybrid Algorithm to Co-scheduling Model of Three Gorges-Gezhou Dam. Wuhan, China: Springer-Verlag; 2009 [cited 2011 Jul 28]. p. 581–90. Available from: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-01510-6_66

(55) Frausto-Solís J, Alonso-Pecina F. A Hybrid Simulated Annealing-Tabu Search Algorithm for Post Enrolment Course Timetabling. 2008;

(56) McCollum B. University timetabling: Bridging the gap between research and practice. 2006. P. 15–35.