



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนแบบขนาน สำหรับกองยานพาหนะ
และอุปกรณ์เครื่องมือในอุตสาหกรรมเกษตร

โดย พศ.ดร. ปรรณนา ปรรณนาดี และคณะ

30 ธันวาคม พ.ศ. 2552

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทดแทนแบบขนาน สำหรับกองยานพาหนะ
และอุปกรณ์เครื่องมือในอุตสาหกรรมเกษตร

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1. ผศ.ดร. ปรรธนา ปรรธนาดี
2. รศ.ดร. พีรยุทธ์ ชาญเศรษฐิกุล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และสกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนแบบขนาน สำหรับกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือ เป็นการวิเคราะห์เพื่อหา กำหนดการที่เหมาะสม (Optimal schedule) ในการเปลี่ยนทดแทนยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือ เพื่อให้ต้นทุนรวม ซึ่ง ประกอบด้วย ต้นทุนคงที่ และต้นทุนการใช้งานและการซ่อมบำรุงยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือ มีค่าต่ำที่สุดตลอด ระยะเวลาวางแผนที่กำหนด ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พิจารณาปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนแบบขนาน สำหรับกอง ยานพาหนะของหน่วยงานรัฐหรือเอกชนที่ใช้ในการให้บริการต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย ยานพาหนะที่มีอายุต่างกันและ ระยะทางการใช้งานสะสมที่ต่างกัน การศึกษาได้พิจารณาประเด็นในการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนแบบขนาน 3 ประเด็นหลัก อันได้แก่ ความเหมาะสมของการใช้นโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่นิยมใช้กันทั่วไปในทางปฏิบัติ การพิจารณา การเปลี่ยนมาใช้พลังงานทางเลือก และการพิจารณารูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้ (“User-preference” pattern of utilization) ซึ่งเป็นรูปแบบการใช้งานที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติ นโยบายการเปลี่ยนทดแทนแบบขนานที่ หน่วยงานหรือผู้ประกอบการนิยมใช้กันทั่วไป ประกอบด้วย การซื้อเฉพาะยานพาหนะใหม่มาเปลี่ยนทดแทนเท่านั้น (Purchase-new-vehicles-only rule) การจำหน่ายยานพาหนะที่เหมือนกันพร้อมกันทั้งหมด (No-splitting-in-selling rule) การซื้อยานพาหนะเพียงรูปแบบเดียวมาใช้งาน (One-purchase-choice rule) และการจำหน่ายยานพาหนะที่เก่ากว่าก่อน (Older-vehicles-selling rule) นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้พิจารณาโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่อาจมีได้เป็นที่นิยมใช้กัน แต่ ได้มีผู้เสนอไว้ในเอกสารวิชาการ คือ การตัดสินใจเปลี่ยนทดแทนทั้งหมดหรือไม่เปลี่ยนทดแทนเลย (All-or-none rule) สำหรับการพิจารณาการเปลี่ยนมาใช้พลังงานทางเลือก ผู้วิจัยได้พิจารณาการใช้พลังงานทางเลือกที่นิยมใช้ในประเทศไทย 2 ประเภท คือ ก๊าซธรรมชาติอัด (Compressed Natural Gas, CNG) และก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas, LPG) ส่วนการพิจารณารูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้นั้น เป็นการพิจารณาถึงรูปแบบการใช้งานจริง ซึ่งผู้ใช้งานยานพาหนะหรืออุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ มักจะนิยมใช้ยานพาหนะหรืออุปกรณ์เครื่องมือที่ใหม่กว่ามากกว่าการใช้ ยานพาหนะหรืออุปกรณ์เครื่องมือที่เก่า ทำให้ยานพาหนะหรืออุปกรณ์เครื่องมือที่มีอายุมากมักจะมีอัตราการใช้งานต่อปีที่ ต่ำกว่ายานพาหนะหรืออุปกรณ์เครื่องมือที่ใหม่กว่า ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองปัญหาการเปลี่ยนทดแทน แบบขนานสำหรับกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือซึ่งได้รวมถึงประเด็นต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ในรูปแบบของ โปรแกรมเชิงเส้นแบบจำนวนเต็ม (Integer linear program) และทดสอบกับปัญหาทดสอบขนาดเล็กภายใต้สถานการณ์ ต่างๆ รวมทั้งแก้ปัญหาขนาดใหญ่ซึ่งได้อ้างอิงข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์มาจากระบบจริง เพื่อสรุปผลของการใช้นโยบาย การวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนแบบขนานต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับกำหนดการในการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุด รวมทั้งสรุปผลของการพิจารณาการเปลี่ยนมาใช้พลังงานทางเลือก ภายใต้รูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้ ผลการศึกษาพบว่า นโยบายการซื้อเฉพาะยานพาหนะใหม่มาเปลี่ยนทดแทน เป็นนโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่ไม่เหมาะสม การซื้อยานพาหนะที่ค่อนข้างใหม่ มีอายุการใช้งานน้อยมาใช้งานจะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากกว่า ส่วนนโยบายการ เปลี่ยนทดแทนอื่นๆ นั้น ถึงแม้จะไม่ใช้นโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุด แต่ก็สามารถลดค่าใช้จ่ายโดยรวม ได้มาก นอกจากนี้ พบว่าการเลือกใช้พลังงานทางเลือกก๊าซปิโตรเลียมเหลวจะประหยัดค่าใช้จ่ายโดยรวมได้มากกว่าการใช้ ก๊าซธรรมชาติอัด เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งที่ต่ำกว่า

คำสำคัญ: การเปลี่ยนทดแทนแบบขนาน; นโยบายการเปลี่ยนทดแทน; รูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้; พลังงานทางเลือก

ABSTRACT

Parallel fleet replacement problem dealt with determining an optimal replacement schedule that resulted in a minimal total cost of owning and operating a fleet within a finite planning horizon. In this research, the fleet consisted of service vehicles, varying in ages and cumulative mileages, commonly owned by government agencies or private business organizations. The paper focused on three main aspects of the problem, which included effects of some commonly used replacement policies on the optimal replacement schedule, consideration of alternative fuel vehicles for replacement, and a new “user-preference” pattern of utilization. The replacement policies for vehicle replacement under study include purchase-new-vehicles-only, no-splitting-in-selling, one-purchase-choice, older-vehicles-selling, and all-or-none rules. The initial fleet consisted of gasoline vehicles, while alternative-fuel vehicles using either compressed natural gas (CNG) or liquefied petroleum gas (LPG) were included as challengers in every replacement decision period. The user-preference utilization pattern denoted a pattern in which yearly usages of vehicles decline as the vehicles grew older or had higher cumulative mileage. Integer programming formulation of the defined problem that incorporated these new factors was provided. Small numerical examples under various scenarios and a large problem instance with model parameters estimated from actual data were solved to optimality to gain some insights about the replacement policies and other considered factors. The findings from computational study revealed that the purchasing-new-vehicle-only rule was a very non-economical rule, and that the decision maker should consider buying some used vehicles in their early ages. Other widely used replacement policies, including one-purchase-choice for each period, selling-older-vehicle first, and no-splitting-in-selling, although were not optimal policies, were cost effective; and the rarely used all-or-none rule was also very cost effective. It was also found that the most economical fuel option for vehicle replacement, based on the estimated cost components data in Thailand, was liquefied petroleum gas (LPG) due to its lower installation cost than that of the compressed natural gas (CNG).

Keywords: Parallel fleet replacement, replacement policy, user preference utilization pattern, alternative fuels

บทสรุปผู้บริหาร (EXECUTIVE SUMMARY)

ปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนแบบขนาน (Parallel fleet replacement problems) เป็นการวิเคราะห์เพื่อหา กำหนดการที่เหมาะสม (Optimal schedule) ในการเปลี่ยนทดแทนยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือให้ต้นทุนรวมที่ต่ำ ที่สอดคล้องระยะเวลาวางแผนที่กำหนด ต้นทุนในการเปลี่ยนทดแทนยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือ ประกอบด้วย ต้นทุน คงที่ และต้นทุนการใช้งานและการซ่อมบำรุงยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือ โดยทั่วไป เมื่อยานพาหนะหรืออุปกรณ์ เครื่องมือมีอายุการใช้งานมากขึ้น สมรรถนะและประสิทธิภาพในการทำงานของยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือจะต่ำลง และมีต้นทุนการใช้งานและการซ่อมบำรุงที่สูงขึ้น ดังนั้น เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่ง หน่วยงานหรือผู้ประกอบการจึงจำเป็นต้อง พิจารณาเปลี่ยนทดแทนยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือในหน่วยงานของตน ปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทน แบบขนานนี้พบได้ทั่วไปในองค์กรต่างๆ เช่น ในองค์กรของรัฐหรือเอกชน ซึ่งอาจมีกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือ ต่างๆ ที่มีไว้ใช้ให้บริการต่างๆ ในหน่วยงาน ยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือที่มีอยู่อาจมีหลายรูปแบบ หลายโมเดล รวมทั้งมีอายุการใช้งานที่ต่างกันและปริมาณการใช้งานสะสมที่ต่างกัน ซึ่งความแตกต่างนี้ทำให้เกิดรูปแบบการใช้งานตาม ความพึงพอใจของผู้ใช้ ("User-preference" utilization pattern) อันเป็นรูปแบบการใช้งานที่ผู้ใช้งานพาหนะหรืออุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆ มักจะนิยมใช้สินทรัพย์ที่ใหม่กว่ามากกว่าการใช้สินทรัพย์ที่เก่า ทำให้สินทรัพย์ที่มีอายุน้อยมักจะมีอัตราการใช้ งานต่อปีต่ำกว่าสินทรัพย์ที่มีอายุน้อยกว่า ส่งผลให้สินทรัพย์ที่ใหม่กว่าอาจจะมีต้นทุนการใช้งานและการซ่อมบำรุงสูง กว่าหรือไม่แตกต่างจากต้นทุนของสินทรัพย์ที่เก่ากว่าก็ได้ ดังนั้นในการแก้ปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนแบบ ขนานจึงควรพิจารณาถึงรูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้ มากกว่าการใช้รูปแบบการใช้งานแบบคงที่ (Constant utilization pattern) ที่นิยมตั้งข้อสมมติไว้ในการวิเคราะห์ปัญหาการเปลี่ยนทดแทนแบบขนานทั่วไป

ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้พิจารณาความเหมาะสมของการใช้นโยบายการเปลี่ยนทดแทนต่างๆ ที่นิยมใช้กันทั่วไป และ การเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงทางเลือก (Alternative fuels) ในปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนแบบขนานสำหรับ ยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือ ภายใต้รูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้ นโยบายการเปลี่ยนทดแทนแบบ ขนานที่พิจารณา ประกอบด้วย การซื้อเฉพาะยานพาหนะใหม่มาเปลี่ยนทดแทนเท่านั้น (Purchase-new-vehicles-only rule) การจำหน่ายยานพาหนะที่เหมือนกันพร้อมกันทั้งหมด (No-splitting-in-selling rule) การซื้อยานพาหนะเพียงรูปแบบ เดียวมาใช้ (One-purchase-choice rule) การจำหน่ายยานพาหนะที่เก่ากว่าก่อน (Older-vehicles-selling rule) และ การตัดสินใจเปลี่ยนทดแทนทั้งหมดหรือไม่เปลี่ยนทดแทนเลย (All-or-none rule) นโยบายการเปลี่ยนทดแทน 4 นโยบาย แรกเป็นนโยบายที่นิยมใช้กันในทางปฏิบัติ ส่วนนโยบายสุดท้ายเป็นนโยบายที่อาจไม่เป็นที่นิยมใช้มากนัก แต่ได้มีผู้ นำเสนอไว้ในเอกสารวิชาการ และได้มีการพิสูจน์แล้วว่าเป็นนโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ข้อสมมติ บางประการ ดังนั้น ผู้วิจัยได้สนใจศึกษาความเหมาะสมของการนำนโยบายการเปลี่ยนทดแทนดังกล่าวมาใช้ในปัญหานี้ สำหรับการพิจารณาการเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงทางเลือกนั้น มีความสำคัญอย่างมากในสถานะเศรษฐกิจปัจจุบัน ทั้งนี้ เนื่องจากในปัจจุบันผู้ประกอบการจำเป็นต้องแข่งขันด้านราคามาก แต่ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งเป็นต้นทุนหลักในการ บริหารงานของหลายองค์กรกลับมีการปรับตัวสูงขึ้นมาก อีกทั้งยังมีความผันผวนของราคามาก การพิจารณาเปลี่ยนมาใช้ พลังงานทางเลือกอื่นๆ จะสามารถช่วยลดต้นทุนในการดำเนินงานของผู้ประกอบการได้เป็นอย่างดี ในการศึกษานี้ ผู้วิจัย ได้พิจารณาการเลือกใช้พลังงานทางเลือกหลักสำหรับยานพาหนะ ตามที่นิยมใช้กันในประเทศไทย 2 ประเภท คือ ก๊าซ

ธรรมชาติ (Compressed Natural Gas, CNG) และก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas, LPG) สำหรับยานยนต์

โปรแกรมเชิงเส้นแบบจำนวนเต็ม (Integer linear program) สำหรับปัญหาการเปลี่ยนทดแทนแบบขนาน สำหรับกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือที่ไดรรวมถึงประเด็นต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ได้ถูกพัฒนาขึ้นและนำมาใช้ในการทดสอบกับปัญหาทดสอบขนาดเล็กภายใต้สถานการณ์ต่างๆ และปัญหาทดสอบขนาดใหญ่ ซึ่งได้อ้างอิงข้อมูลในการวิเคราะห์มาจากระบบจริง เพื่อสรุปผลของการนำนโยบายการเปลี่ยนทดแทนแบบขนานต่างๆ มาใช้ เปรียบเทียบกับกำหนดการในการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุด รวมทั้งสรุปผลของการพิจารณาการเปลี่ยนมาใช้พลังงานทางเลือกภายใต้รูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้ที่ได้นำเสนอ ผลการศึกษาพบว่า นโยบายการซื้อเฉพาะยานพาหนะใหม่มาเปลี่ยนทดแทนเป็นนโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่ไม่เหมาะสม การซื้อยานพาหนะที่ค่อนข้างใหม่และมีอายุการใช้งานน้อยมาใช้งานจะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนทดแทนได้มากกว่า ส่วนนโยบายการเปลี่ยนทดแทนอื่นๆ นั้น ถึงแม้จะไม่ใช่นโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุด แต่ก็สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายโดยรวมได้มาก นอกจากนี้พบว่าทางเลือกใช้เชื้อเพลิงทางเลือกก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) จะประหยัดค่าใช้จ่ายโดยรวมได้มากกว่าการใช้ก๊าซธรรมชาติอัด (CNG) เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งที่ต่ำกว่า

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การทบทวนวรรณกรรม	3
คุณลักษณะของปัญหาที่ศึกษา	5
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	8
การทดสอบแก้ปัญหาการเปลี่ยนทดแทนแบบขนานของกองยานพาหนะ	16
- ปัญหาการเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะแบบขนานขนาดเล็กที่มีระยะเวลาวางแผนสั้น	16
- ปัญหาการเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะแบบขนานขนาดใหญ่ที่มีระยะเวลาวางแผนยาว	21
สรุปผล	29
เอกสารอ้างอิง	30
ภาคผนวก	31
- OUTPUT ที่ได้จากโครงการ	
- MANUSCRIPT	

การวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนแบบขนาน สำหรับกองยานพาหนะ และอุปกรณ์เครื่องมือในอุตสาหกรรมเกษตร

คำนำ

ปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนแบบขนาน (Parallel fleet replacement problems) เป็นการวิเคราะห์เพื่อหา
กำหนดการที่เหมาะสม (Optimal schedule) ในการเปลี่ยนทดแทนยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือให้ต้นทุนรวมที่ต่ำ
ที่สุดตลอดระยะเวลาวางแผนที่กำหนด ต้นทุนในการเปลี่ยนทดแทนยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือ ประกอบด้วย ต้นทุน
คงที่ และต้นทุนการใช้งานและการซ่อมบำรุงยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือ โดยทั่วไป เมื่อยานพาหนะหรืออุปกรณ์
เครื่องมือมีอายุการใช้งานมากขึ้น สมรรถนะและประสิทธิภาพในการทำงานของยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือจะต่ำลง
และมีต้นทุนการใช้งานและการซ่อมบำรุงที่สูงขึ้น ดังนั้น เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่ง หน่วยงานหรือผู้ประกอบการจึงจำเป็นต้อง
พิจารณาเปลี่ยนทดแทนยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือในหน่วยงานของตน

ปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนแบบขนานนั้นพบได้ทั่วไปในองค์กรต่างๆ เช่น ในองค์กรของรัฐหรือเอกชน ซึ่ง
อาจมีกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ ที่มีไว้ให้บริการต่างๆ ในหน่วยงาน ยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือ
ที่มีอยู่อาจมีหลายรูปแบบ หลายโมเดล รวมทั้งมีอายุการใช้งานที่แตกต่างกันและปริมาณการใช้งานสะสมที่แตกต่างกัน ซึ่ง
ความแตกต่างนี้ทำให้เกิดรูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้ (“User-preference” utilization pattern) อันเป็น
รูปแบบการใช้งานที่ผู้ใช้งานยานพาหนะหรืออุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ มักจะนิยมใช้สินทรัพย์ที่ใหม่กว่า มากกว่าการใช้สินทรัพย์
ที่เก่า ทำให้สินทรัพย์ที่มีอายุมากมักจะมีอัตราการใช้งานต่อปีที่ต่ำกว่าสินทรัพย์ที่มีอายุน้อยกว่า แม้ว่าสินทรัพย์ที่ถูกผลิต
ขึ้นมาใหม่จะมีการปรับปรุงทางด้านเทคโนโลยี ทำให้สินทรัพย์มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่า รวมทั้งมีต้นทุนการใ
้งานและการซ่อมบำรุงต่อหน่วยต่ำกว่าสินทรัพย์ที่เก่า (ดังเช่นในกรณีของยานพาหนะ คอมพิวเตอร์ เครื่องจักร/เครื่องมือที่
ใช้ในการผลิตและในห้องปฏิบัติการ ฯลฯ) แต่โดยมาก การปรับปรุงทางด้านเทคโนโลยีมักไม่สามารถชดเชยการเสื่อม
สมรรถนะของสินทรัพย์อันเนื่องมาจากการใช้งานได้ ดังนั้น ยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือที่ใหม่กว่า ซึ่งมีอัตราการใช้
งานสูงกว่า อาจจะมีต้นทุนการใช้งานและการซ่อมบำรุงยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือสูงกว่าหรือไม่แตกต่างจาก
ต้นทุนของยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือที่เก่ากว่าก็ได้ ในการแก้ปัญหาคำวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนแบบขนาน
ควรจะมีการพิจารณาถึงรูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้ แทนการใช้รูปแบบการใช้งานแบบคงที่ (Constant
utilization pattern) ที่นิยมตั้งข้อสมมติไว้ในการศึกษาปัญหาการเปลี่ยนทดแทนแบบขนานทั่วไป

นอกจากการพิจารณารูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้แล้ว ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยยังได้พิจารณาการเปลี่ยน
มาใช้พลังงานเชื้อเพลิงทางเลือก (Alternative fuels) อีกด้วย ทั้งนี้ เนื่องจากราคาน้ำมันในปัจจุบันได้มีการปรับตัวสูงขึ้น
มาก รวมทั้งยังมีความผันผวนของราคาสูง ทำให้ผู้ประกอบการจำเป็นต้องพิจารณาเปลี่ยนมาใช้พลังงานทางเลือกอื่นๆ
โดยเฉพาะในภาคการขนส่ง ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้พิจารณาการเลือกใช้พลังงานทางเลือกหลักสำหรับยานพาหนะ
ตามที่ยอมรับกันในประเทศไทย 2 ประเภท คือ ก๊าซธรรมชาติอัด (Compressed Natural Gas, CNG) และก๊าซปิโตรเลียม
เหลว (Liquefied Petroleum Gas, LPG) สำหรับยานยนต์

สุดท้าย ผู้วิจัยได้พิจารณาความเหมาะสมของการใช้นโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่นิยมใช้กันทั่วไป ซึ่งประกอบด้วย การซื้อเฉพาะยานพาหนะใหม่มาเปลี่ยนทดแทนเท่านั้น (Purchase-new-vehicles-only rule) การจำหน่ายยานพาหนะที่เหมือนกันพร้อมกันทั้งหมด (No-splitting-in-selling rule) การซื้อยานพาหนะเพียงรูปแบบเดียวมาใช้งาน (One-purchase-choice rule) และการจำหน่ายยานพาหนะที่เก่ากว่าก่อน (Older-vehicles-selling rule) รวมทั้งได้พิจารณาโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่อาจไม่ได้เป็นที่นิยมใช้กันมาก แต่ได้มีผู้นำเสนอไว้ในเอกสารวิชาการและได้มีการพิสูจน์แล้วว่าเป็นนโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ข้อสมมติบางประการ คือ การตัดสินใจเปลี่ยนทดแทนทั้งหมดหรือไม่เปลี่ยนทดแทนเลย (All-or-none rule)

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นแบบจำนวนเต็ม (Integer linear program) สำหรับปัญหาการเปลี่ยนทดแทนแบบขนานสำหรับกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือ ซึ่งได้รวมถึงประเด็นต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น และทำการทดสอบกับปัญหาทดสอบขนาดเล็กภายใต้สถานการณ์ต่างๆ รวมทั้งทดสอบกับปัญหามาตรฐานใหญ่ซึ่งได้อ้างอิงข้อมูลต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์มาจากระบบจริง เพื่อให้ปัญหาที่ศึกษามีลักษณะเหมือนจริงมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ผลของการวิเคราะห์กับปัญหาทดสอบนี้สามารถนำมาสรุปผลของการนำนโยบายการเปลี่ยนทดแทนแบบขนานต่างๆ มาใช้ เปรียบเทียบกับผลจากการกำหนดการในการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุด รวมทั้งสามารถสรุปผลของการเปลี่ยนมาใช้พลังงานทางเลือก ภายใต้รูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้ ซึ่งจะนำเสนอผลการศึกษาลำดับต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นแบบจำนวนเต็ม สำหรับปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือแบบขนาน ภายใต้รูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้ (User-preference utilization pattern) และเพื่อคำนวณหา “กำหนดการการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุด” (Optimal Replacement Schedule) ในเชิงเศรษฐศาสตร์
2. เพื่อศึกษาถึงความเหมาะสมของการนำนโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่นิยมใช้กันทั่วไปและที่ได้มีการนำเสนอไว้ในเอกสารวิชาการมาใช้ ภายใต้รูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้ ซึ่งเป็นรูปแบบการใช้งานที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติ
3. เพื่อพิจารณาการใช้พลังงานเชื้อเพลิงทางเลือกที่เหมาะสมกับกองยานพาหนะในประเทศไทย

การทบทวนวรรณกรรม

ปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ ปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนแบบอนุกรม (Serial replacement problem) และปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนแบบขนาน (Parallel replacement problem) ปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนแบบอนุกรม เป็นปัญหาการเปลี่ยนทดแทนยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือหรือสินทรัพย์เพียงชิ้นเดียว (Single asset) ปัญหานี้ได้มีการศึกษาไว้มากมาย ดังเช่น Fraser and Posey (1989), Hopp and Nair (1991), Bean et al. (1994) เป็นต้น ส่วนการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนแบบขนาน จะเป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือหรือสินทรัพย์จำนวนหลายชิ้น โดยตัดสินใจเปลี่ยนทดแทนสินทรัพย์แต่ละชิ้นขนานกันไปอย่างเกี่ยวเนื่องกัน กล่าวคือ (1) สินทรัพย์ทั้งหมดอาจมีไว้เพื่อตอบสนองต่อปริมาณความต้องการใช้ (Demand) โดยรวมที่ได้กำหนดไว้ (Hartman, 1999) และ/หรือ (2) ผู้ประกอบการอาจมีงบประมาณที่จำกัดในการเปลี่ยนทดแทนสินทรัพย์ขององค์กรในแต่ละปี (Karabakal et al., 1994) และ/หรือ (3) การตัดสินใจซื้อสินทรัพย์เป็นจำนวนหลายชิ้นอาจส่งผลให้ได้รับส่วนลดจากผู้ขาย (Economies of scale) (Jones et al., 1991; Hopp et al., 1993; Tang and Tang, 1993; Chen, 1998) ดังนั้น ปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือแบบขนานจึงเป็นการพิจารณาหาจุดสมดุลของต้นทุนค่าใช้จ่ายต่างๆ (Cost trade-offs) ซึ่งรวมถึงต้นทุนในการลงทุนซื้อยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือ ต้นทุนการใช้งานและการซ่อมบำรุงของยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือเก่าและใหม่ และรายได้จากการจำหน่ายซากยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือเดิม ตัวอย่างงานวิจัยปัญหาการเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือแบบขนาน ได้แก่ Hartman (2000, 2001, 2004, 2006), Ban and Hartman (2002), Chang (2005), Yatsenko and Hritonenko (2008) เป็นต้น

Hartman (2000) ศึกษาปัญหาการเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือแบบขนาน ซึ่งพิจารณาต้นทุนการเปลี่ยนทดแทน ร่วมกับข้อจำกัดด้านงบประมาณในการเปลี่ยนทดแทนและข้อจำกัดด้านปริมาณความต้องการใช้กองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือซึ่งเพิ่มสูงขึ้นทุกปี Hartman (2000) ได้เสนอแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นแบบจำนวนเต็ม (Integer linear program) และการผ่อนคลายเชิงเส้น (Linear programming relaxation) ในงานวิจัย จากการศึกษพบว่า การผ่อนคลายเชิงเส้นจะมีค่าจุดมุม (Corner points/extreme points) เป็นเลขจำนวนเต็ม เมื่อทำการกำหนดค่าตัวแปร 0-1 ของปัจจัยด้าน Economies of scale ให้คงที่ ต่อมา Hartman (2001, 2004) ได้ศึกษาปัญหาการเปลี่ยนทดแทนแบบขนาน กรณีที่มีการคำนึงถึงปัจจัยด้านการเสื่อมสมรรถนะของสินทรัพย์อันเนื่องมาจากการใช้งานสะสมและอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้ Hartman (2001, 2004) ได้สมมติให้ผู้ทำการตัดสินใจสามารถควบคุมรูปแบบการใช้งานกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือได้ กล่าวคือ สามารถกำหนดว่าจะให้มีการใช้งานสินทรัพย์แต่ละชิ้นมากน้อยเพียงใด ในแต่ละปี โดยได้รายงานผลของระดับการใช้งานที่แตกต่างกันไว้ใน Hartman (2001) และนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาเชิงพลวัตแบบเฟ้นสุ่ม (Stochastic dynamic programming approach) สำหรับปัญหาที่มีสินทรัพย์ 2 ชิ้นใน Hartman (2004)

Ban and Hartman (2002) ศึกษาปัญหาการเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะแบบขนานในระบบการผลิตแบบสายงานไหลต่อเนื่อง (Flow shop) ซึ่งประกอบด้วยเครื่องจักรที่แตกต่างกันหลายรูปแบบ Ban and Hartman (2002) ได้สร้างแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นแบบจำนวนเต็มเพื่อกำหนดการเปลี่ยนทดแทนเครื่องจักรที่เหมาะสม และพบว่าปัญหานี้ยากต่อการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimal solutions) จึงได้ทำการผ่อนคลายเชิงเส้นและเพิ่มสมการเพื่อปรับปรุง

ขอบเขตล่าง (Lower bounds) ของคำตอบที่เหมาะสม รวมทั้งใช้แบบจำลองโปรแกรมพลวัต (Dynamic programming model) เพื่อหาขอบเขตบน (Lower bounds) ของคำตอบ

Chang (2005) นำเสนอการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนอุปกรณ์เครื่องมือเชิงกลยุทธ์แบบคลุมเครือ (Fuzzy strategic replacement analysis) โดยได้พิจารณาถึงราคาของอุปกรณ์ และความล้าสมัยของอุปกรณ์ในลักษณะคลุมเครือ รวมทั้งนำเสนอการแก้ปัญหาทดสอบ 2 ปัญหาในงานวิจัย Hartman (2006) ได้ศึกษานโยบายการเปลี่ยนทดแทนในกรณีที่ทำการเปลี่ยนทดแทนอุปกรณ์เครื่องมือเมื่อหมดอายุการใช้งาน เพื่อทดสอบว่านโยบายดังกล่าวเป็นนโยบายที่เหมาะสมสำหรับปัญหาที่มีการกำหนดระยะเวลาวางแผนแน่นอน (Finite planning horizon) หรือไม่ และได้สรุปถึงกรณีที่นโยบายดังกล่าวเป็นนโยบายที่เหมาะสม และกรณีที่นโยบายดังกล่าวไม่เหมาะสมเอาไว้ในงานวิจัย Yatsenko and Hritonenko (2008) ได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับการเปลี่ยนทดแทนสินทรัพย์ชิ้นเดียวที่พิจารณาถึงข้อสมมติด้านการเปลี่ยนแปลงด้านเทคโนโลยี ภายใต้ระยะเวลาแบบต่อเนื่อง และพบว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถนำมาใช้หาคำตอบของปัญหาที่ศึกษาได้เป็นอย่างดี

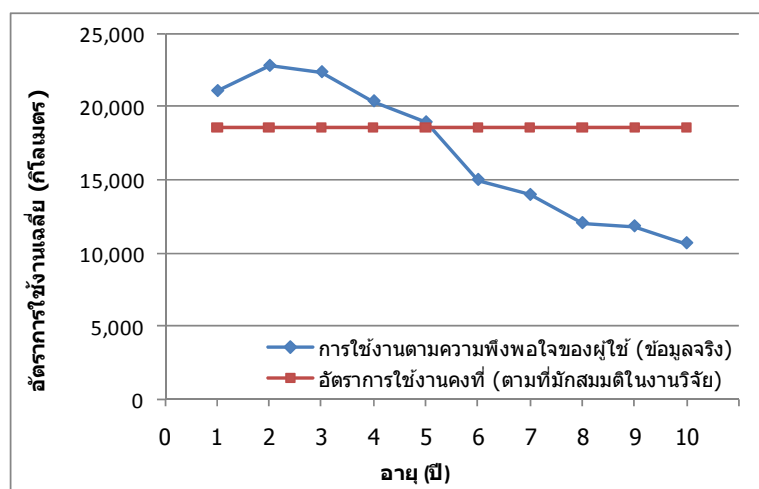
จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่าปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือ นั้น ได้มีผู้สนใจศึกษาวิจัยไว้มากมาย แต่จากการสำรวจของผู้วิจัย พบว่ายังไม่มีผู้ที่ศึกษาถึงรูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้ ("User-preference" utilization pattern) และการพิจารณาการใช้พลังงานทางเลือกในปัญหานี้ ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะทำการศึกษาปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนในลักษณะดังกล่าว

คุณลักษณะของปัญหาที่ศึกษา

ปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือแบบขนานที่ศึกษาในงานวิจัยนี้มีคุณลักษณะที่สำคัญที่ได้นำมาพิจารณา 3 ด้านดังนี้

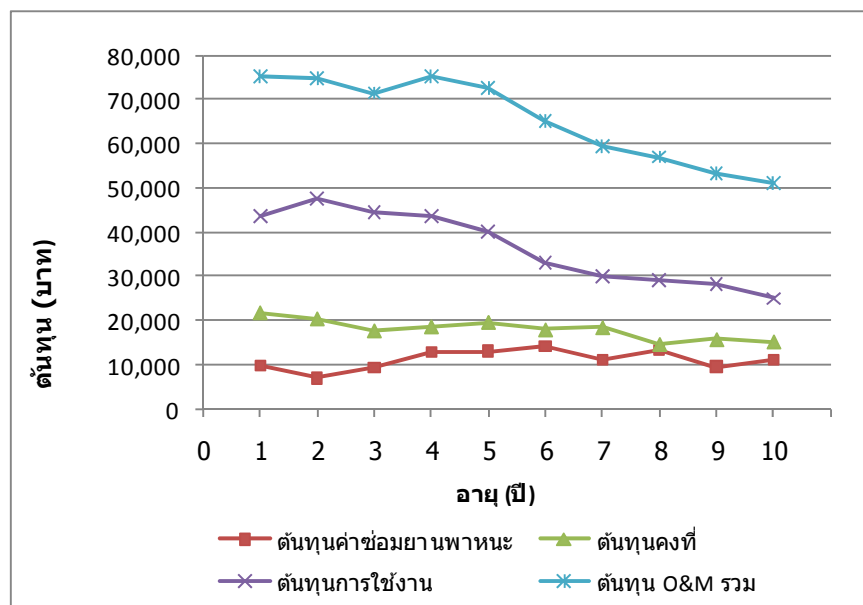
1. รูปแบบการใช้งาน (Utilization patterns) และความสัมพันธ์ต่อต้นทุนค่าใช้จ่าย

ในปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือแบบขนานที่ศึกษาโดยทั่วไป มักจะมีการกำหนดข้อสมมติว่าต้นทุนการใช้งานและการซ่อมบำรุง (Operating and maintenance cost, O&M cost) มีค่าเพิ่มขึ้นหรืออย่างน้อยคงเดิม ตามอายุการใช้งานและปริมาณการใช้งานสะสม (Non-decreasing function of asset age and cumulative utilization) ทั้งนี้เนื่องจากสินทรัพย์มักเสื่อมสภาพลงและมีการซ่อมบำรุงมากขึ้น เมื่ออายุการใช้งานมากขึ้น ข้อสมมติดังกล่าวนั้นเกิดขึ้นจริงในอุปกรณ์และเครื่องมือหลายชนิดที่อายุการใช้งานของสินทรัพย์ไม่ส่งผลต่อความพึงพอใจของผู้ใช้งาน (เช่น เครื่องมือ/อุปกรณ์ที่มีราคาแพงที่องค์กรหนึ่งๆ อาจมีไว้ใช้งานเพียง 1-2 เครื่อง เครื่องจักรที่อยู่ในสายการผลิตต่อเนื่อง เป็นต้น) ทำให้อัตราการใช้งานอุปกรณ์และเครื่องมือเหล่านั้นค่อนข้างคงที่ (Constant utilization rate) แต่ในบางกรณี ผู้ใช้งานอาจมีความพึงพอใจในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใหม่กว่า มีประสิทธิภาพดีกว่า (เช่น ยานพาหนะ คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์และเครื่องมือในห้องปฏิบัติการ ฯลฯ) ทำให้ข้อสมมติของอัตราการใช้งานที่คงที่นั้นไม่เป็นจริง เนื่องจากในกรณีนี้ อัตราการใช้งานอุปกรณ์และเครื่องมือมีแนวโน้มที่ลดลง เมื่ออายุสินทรัพย์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ต้นทุนการใช้งานและการซ่อมบำรุงอาจไม่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือคงเดิมตามอายุการใช้งานและการใช้งานสะสมอีกต่อไป ในงานวิจัยนี้ จึงเน้นศึกษารูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้ดังกล่าว ตัวอย่างรูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้ที่นำเสนอในการศึกษานี้แสดงได้ดังในภาพที่ 1 ซึ่งแสดงกราฟที่สร้างมาจากข้อมูลกองยานพาหนะจริงขององค์กรแห่งหนึ่ง องค์กรนี้มียานพาหนะรถยนต์นั่งส่วนบุคคลสำหรับใช้ให้บริการลูกค้าจำนวน 177 คัน จากภาพที่ 1 จะเห็นได้ว่า โดยรวมแล้ว อัตราการใช้งานเฉลี่ยต่อคันจะลดลงตามอายุของยานพาหนะที่เพิ่มขึ้น จากกราฟ อาจสังเกตได้ว่า อัตราการใช้งานเฉลี่ยของยานพาหนะอายุ 2 ปีจะสูงกว่ายานพาหนะอายุ 1 ปี ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ยานพาหนะใหม่ไม่ได้ถูกซื้อ ณ ต้นปีทุกคัน ทำใหยานพาหนะบางคันอาจมีอัตราการใช้งานในช่วงปีแรกต่ำ



ภาพที่ 1 รูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้ เปรียบเทียบกับรูปแบบการใช้งานที่มักใช้ในงานวิจัย

ต้นทุน O&M ประกอบด้วยต้นทุนการใช้งาน (เช่น เชื้อเพลิง) ต้นทุนคงที่ (เช่น ค่าประกัน และค่าธรรมเนียมอื่นๆ) และค่าซ่อมบำรุงยานพาหนะ (อะไหล่และแรงงานในการซ่อมบำรุง) แนวโน้มของต้นทุนเหล่านี้แสดงได้ดังในภาพที่ 2 ซึ่งจะสังเกตได้ว่า (1) ต้นทุนการใช้งานมีแนวโน้มที่จะลดลงตามอายุการใช้งาน เนื่องจากยานพาหนะที่เก่ามีแนวโน้มที่จะถูกใช้งานน้อยลง ตามความพึงพอใจของผู้ใช้ ทำให้มีต้นทุนค่าเชื้อเพลิง (ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายหลัก) ลดต่ำลง (2) ต้นทุนคงที่มีแนวโน้มที่จะลดลงตามอายุการใช้งานเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากค่าประกันและค่าธรรมเนียมต่างๆ มักจะมีค่าสัมพันธ์กับมูลค่าของยานพาหนะ ซึ่งมีการเสื่อมมูลค่าตามอายุการใช้งาน (3) ค่าซ่อมบำรุงยานพาหนะเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการใช้งาน เนื่องจากยานพาหนะเก่าจำเป็นต้องมีการซ่อมบำรุงมากขึ้น และ (4) ต้นทุนรวมมีแนวโน้มลดลงในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear pattern) กล่าวคือ ค่อนข้างคงที่ในช่วงที่ยานพาหนะมีอายุการใช้งานน้อยๆ และลดลงมากในช่วงหลัง ภาพที่ 2 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าต้นทุน O&M ไม่ได้เป็นไปตามข้อสมมติทั่วไปที่กล่าวว่า ต้นทุน O&M จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรืออย่างน้อยคงเดิมตามอายุการใช้งานและการใช้งานสะสม



ภาพที่ 2 การจำแนกต้นทุนการใช้งานและการซ่อมบำรุงจากข้อมูลจริง

2. พลังงานทางเลือก

จากการที่ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงในตลาดโลกได้ปรับตัวสูงขึ้นและมีความผันผวนมากในช่วงหลายปีที่ผ่านมา รวมถึงการที่ได้มีการพัฒนาและการนำพลังงานทางเลือกมาใช้กันมากขึ้น ทำให้ผู้ประกอบการหันมาพิจารณาเลือกใช้พลังงานทางเลือกในกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือกันมากขึ้นมาก เพื่อลดต้นทุนการดำเนินการของตน ด้วยเหตุผลนี้ ผู้วิจัยจึงได้นำประเด็นนี้มาพิจารณาในการศึกษาปัญหาการเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือแบบขนาน โดยได้พิจารณาการใช้พลังงานเชื้อเพลิงทางเลือกหลัก 2 ประเภทที่นิยมใช้กันในประเทศไทย คือ ก๊าซธรรมชาติอัด (Compressed Natural Gas, CNG) และก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas, LPG)

3. นโยบายการเปลี่ยนทดแทน

ในปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือแบบขนาน มีนโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่ผู้ประกอบการนิยมใช้กันหลายนโยบาย เช่น นโยบายการเปลี่ยนทดแทนด้วยยานพาหนะใหม่เท่านั้น (Purchase-new-vehicles-only rule) และนโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่ได้มีการนำเสนอไว้ในเอกสารวิชาการ ได้แก่

- นโยบายการเก็บหรือจำหน่ายยานพาหนะที่เหมือนกันพร้อมกันทั้งหมด “No Splitting Rule” (NSR) ซึ่งกล่าวว่า ยานพาหนะที่ใช้เครื่องยนต์แบบเดียวกันและมีอายุเท่ากันควรจะถูกเปลี่ยนทดแทนพร้อมกันเสมอ (Jones et al., 1991)
- นโยบายการเปลี่ยนทดแทนยานพาหนะที่เก่ากว่าก่อน “Older Cluster Replacement Rule” (OCRR) ซึ่งกล่าวว่า ยานพาหนะที่มีอายุมากกว่าควรถูกเปลี่ยนทดแทนก่อนเสมอ (Jones et al., 1991; Hopp et al., 1993)
- นโยบายเปลี่ยนทดแทนทั้งหมดหรือไม่เปลี่ยนทดแทนเลย “All-or-none rule” (AONR) ซึ่งกล่าวว่า ในระยะเวลาหนึ่งๆ ผู้ประกอบการควรตัดสินใจเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือทั้งหมดหรือตัดสินใจไม่เปลี่ยนทดแทนเลย (Tang and Tang, 1993)

เนื่องจากในปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือแบบขนาน ภายใต้รูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้ ที่ศึกษานี้ อาจมีข้อสมมติของต้นทุนค่าใช้จ่ายที่แตกต่างจากปัญหาการเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือแบบขนานทั่วไป ดังนั้น นโยบายที่ได้มีการพิสูจน์แล้วว่าเหมาะสมที่สุดภายใต้ข้อสมมติของต้นทุนค่าใช้จ่ายบางรูปแบบ อาจไม่ใช่ นโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุด (Optimum policies) สำหรับปัญหานี้ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาความเหมาะสมของการนำนโยบายการเปลี่ยนทดแทนต่างๆ เหล่านี้มาใช้งานในปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนแบบขนานที่มีรูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองสำหรับปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือแบบขนาน ภายใต้รูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้ในงานวิจัยนี้ สร้างโดยดัดแปลงแบบจำลองที่นำเสนอโดย Hartman (1999) โดยได้เพิ่มการพิจารณาถึงรูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้ และการพิจารณาใช้พลังงานทางเลือกต่างๆ เข้าไปในแบบจำลอง รวมทั้งได้สมมติว่าอัตราการใช้งานของยานพาหนะที่อายุเดียวกันจะมีค่าเท่ากัน และเป็นไปตามรูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้ ซึ่งแตกต่างจากในแบบจำลองของ Hartman (1999) ที่กำหนดให้อัตราการใช้งานเป็นตัวแปรการตัดสินใจ (กล่าวคือ สมมติให้ผู้ประกอบการสามารถกำหนดอัตราการใช้งานที่เหมาะสมให้ยานพาหนะแต่ละคันได้) แบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นแบบจำนวนเต็มสำหรับปัญหาที่ศึกษาสามารถแสดงได้ดังนี้

ดัชนี

- i อายุของยานพาหนะ โดยที่ $i = \{0, 1, 2, \dots, N\}$ และ N = อายุการใช้งานสูงสุดของยานพาหนะ
- j ช่วงเวลาที่พิจารณา โดยที่ $j = \{0, 1, 2, \dots, T\}$ และ T = ระยะเวลาในการวางแผน (Planning horizon)
- o ทางเลือกในการใช้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ โดยที่ $o = 1$ หมายถึง เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซิน และ $o = 2, \dots, O$ หมายถึง เครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ

พารามิเตอร์

- f แฟคเตอร์ของการคิดลดต่อช่วงเวลา (Discount factor per period)
- p_{oj} ราคาซื้อต่อหน่วยของยานพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิงชนิด o อายุ i ปีในช่วงเวลา j
- k_j ต้นทุนคงที่ของการจัดซื้อยานพาหนะในช่วงเวลา j
- c_{oj} ต้นทุนการดำเนินการและซ่อมบำรุง (Operating and maintenance costs หรือ O&M costs) ของยานพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิงชนิด o อายุ i ปีในช่วงเวลา j โดยต้นทุนนี้ได้รวมค่าประกันภัย ค่าเสื่อมราคา และต้นทุนอื่นๆของยานพาหนะแล้ว
- r_{oj} ค่าซากของยานพาหนะเก่าที่ใช้เชื้อเพลิงชนิด o อายุ i ปีในช่วงเวลา j
- u_i อัตราการใช้งานรายปี (Annual utilization rate) ของยานพาหนะที่มีอายุ i ปี ซึ่งมีค่าเป็นไปตามข้อสังเกตที่ว่า “ยานพาหนะที่ใหม่กว่ามักมีแนวโน้มที่จะถูกใช้งานมากกว่า เนื่องมาจากความพึงพอใจของผู้ใช้”
- d_j ปริมาณความต้องการใช้งาน (Demand) ของกองยานพาหนะในช่วงเวลา j
- h_{oi} จำนวนยานพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิงชนิด o อายุ i ปีที่มีอยู่ในกองยานพาหนะเริ่มต้น (เวลาที่ 0)

ตัวแปรในการตัดสินใจ

- b_{oj} จำนวนยานพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิงชนิด o อายุ i ปีที่ถูกซื้อในช่วงเวลา j
- v_{oj} จำนวนยานพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิงชนิด o อายุ i ปีที่มีอยู่ในกองยานพาหนะในช่วงเวลา j
- s_{oj} จำนวนยานพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิงชนิด o อายุ i ปีที่ถูกขายในช่วงเวลา j
- δ_{oj} ตัวแปร 0-1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อมีการสั่งซื้อยานพาหนะในช่วงเวลา j และเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการสั่งซื้อยานพาหนะในช่วงเวลาดังกล่าว

- x_{oij} ตัวแปร 0-1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อมีการซื้อยานพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิงชนิด o อายุ i ปีในปลายช่วงเวลา j และเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการซื้อยานพาหนะดังกล่าวในช่วงเวลาดังกล่าว
- y_{oij} ตัวแปร 0-1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อมียานพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิงชนิด o อายุ i ปีในกองยานพาหนะในช่วงเวลา j และเท่ากับ 0 เมื่อไม่มียานพาหนะดังกล่าวในช่วงเวลาดังกล่าว
- z_{oij} ตัวแปร 0-1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อมีการขายยานพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิงชนิด o อายุ i ปีในช่วงเวลา j และเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการขายยานพาหนะดังกล่าวในช่วงเวลาดังกล่าว

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

$$\text{Minimize} \quad \sum_{j=0}^{T-1} f^j \left(\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{o=1}^O p_{oij} b_{oij} + k_j \delta_j \right) + \sum_{j=0}^{T-1} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{o=1}^O f^{j+1} c_{oij} v_{oij} - \sum_{j=0}^T \sum_{i=0}^N \sum_{o=1}^O f^j r_{oij} s_{oij} \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{o=1}^O u_i v_{oij} \geq d_j \quad \forall j < T \quad (2)$$

$$b_{oij} - v_{oij} = 0 \quad \forall o; i = 0; \forall j < T \quad (3)$$

$$h_{oi} + b_{oij} = v_{oij} + s_{oij} \quad \forall o; \forall 0 < i < N; j = 0 \quad (4)$$

$$v_{o,i-1,j-1} + b_{oij} = v_{oij} + s_{oij} \quad \forall o; \forall 0 < i < N; \forall 0 < j < T \quad (5)$$

$$h_{oi} - s_{oij} = 0 \quad \forall o; \forall i = N; j = 0 \quad (6)$$

$$v_{o,i-1,j-1} - s_{oij} = 0 \quad \{\forall o; \forall i = N; \forall j\} \text{ or } \{\forall o; \forall i > 0; j = T\} \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{o=1}^O b_{oij} \leq M \delta_j \quad \forall j < T \quad (8)$$

$$v_{oij}, b_{oij}, s_{ijo} \in \{0,1,2,\dots\} \quad \forall o; \forall i; \forall j \quad (9)$$

$$\delta_j \in \{0,1\} \quad \forall o; \forall i; \forall j \quad (10)$$

ในแบบจำลองข้างต้น ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (1) มีจุดมุ่งหมายเพื่อคำนวณหากำหนดการเปลี่ยนทดแทนที่ให้กระแสเงินสดคิดลดรวม (The total discounted cash flows) ที่ต่ำที่สุด โดยคำนึงถึง ต้นทุนในการจัดซื้อยานพาหนะใหม่ ต้นทุน O&M และค่าขายซากที่ได้จากการขายยานพาหนะเก่า ตลอดช่วงระยะเวลาวางแผน ในที่นี้ สมมติให้มีการจัดซื้อยานพาหนะใหม่ และการขายยานพาหนะเก่าที่ต้นปี ส่วนต้นทุน O&M นั้นจะคิดที่ปลายปี ข้อจำกัดที่ (2) กำหนดว่าจะต้องมีจำนวนยานพาหนะเพียงพอต่อการใช้งานในแต่ละช่วงเวลา ข้อจำกัดที่ (3) กำหนดให้มีการใช้ยานพาหนะใหม่ ข้อจำกัดที่ (4) และ (5) แสดงถึงสมดุลของจำนวนยานพาหนะที่มีอยู่ในกองยานพาหนะจากช่วงเวลาหนึ่งไปยังอีกช่วงเวลาหนึ่ง โดยที่ข้อจำกัดที่ (4) แสดงถึงสมดุลของจำนวนยานพาหนะในช่วงเวลาเริ่มต้น และข้อจำกัดที่ (5) แสดงถึงสมดุลของจำนวนยานพาหนะในช่วงเวลาอื่นๆ ข้อจำกัดที่ (6) กล่าวว่า ยานพาหนะในกองยานพาหนะเริ่มต้นที่ถึงอายุการใช้งานสูงสุดที่ได้กำหนดไว้จะต้องถูกขายทิ้งทั้งหมด ข้อจำกัดที่ (7) กำหนดให้มีการขายยานพาหนะทิ้งเมื่อถึงอายุการใช้งานสูงสุด หรือเมื่อสิ้นสุดระยะเวลา

วางแผนที่พิจารณา ข้อจำกัดที่ (8) กำหนดให้มีการคิดต้นทุนคงที่ของการจัดซื้อยานพาหนะ หากมีการสั่งซื้อยานพาหนะในช่วงเวลานั้นๆ ส่วนข้อจำกัดที่ (9) และ (10) เป็นเพียงการกำหนดคุณสมบัติของตัวแปรการตัดสินใจ

สำหรับรูปแบบการใช้งานยานพาหนะตามความพึงพอใจของผู้ใช้ ซึ่งกำหนดว่า “ยานพาหนะที่ใหม่กว่าจะมีแนวโน้มที่จะถูกใช้งานมากกว่า” นั้น ได้ถูกรวมเข้าในแบบจำลองผ่านพารามิเตอร์สองตัว คือ อัตราการใช้งานของยานพาหนะ (u_i) และต้นทุน O&M (c_{oij}) ค่าของพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ถูกประมาณขึ้นมาจากต้นทุนค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจริงจากข้อมูลที่ได้รวบรวมมาจากการประกอบการ ซึ่งพบว่าแนวโน้มลดลงตามอายุของยานพาหนะ

สมการและอสมการทางคณิตศาสตร์ของนโยบายการเปลี่ยนทดแทน

ในส่วนนี้ จะพิจารณาโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่มีการใช้ในปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนแบบขนาน 5 นโยบาย ได้แก่ การซื้อเฉพาะยานพาหนะใหม่มาเปลี่ยนทดแทนเท่านั้น (Purchase-new-vehicles-only rule, PNOR) การจำหน่ายยานพาหนะที่เหมือนกันพร้อมกันทั้งหมด (No-splitting-in-selling rule, NSSR) การซื้อยานพาหนะเพียงรูปแบบเดียวมาใช้งาน (One-purchase-choice rule, OPCR) การจำหน่ายยานพาหนะที่เก่ากว่าก่อน (Older-vehicles-selling rule, OVSR) และการตัดสินใจเปลี่ยนทดแทนทั้งหมดหรือไม่เปลี่ยนทดแทนเลย (All-or-none rule, AONR) และศึกษาโดยนำนโยบายทั้งห้าดังกล่าวมาแสดงในรูปสมการและอสมการทางคณิตศาสตร์แล้วรวมเข้าในแบบจำลองสำหรับปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนของยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือแบบขนาน ภายใต้รูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้ เพื่อศึกษาถึงผลของการนำนโยบายการเปลี่ยนทดแทนดังกล่าวมาใช้

(1) นโยบายการซื้อเฉพาะยานพาหนะใหม่มาเปลี่ยนทดแทนเท่านั้น (Purchase-new-vehicles-only rule, PNOR)

นโยบาย PNOR เป็นนโยบายที่มีผู้นิยมใช้กันมากในทางปฏิบัติมาก องค์กรหลายแห่งมักจะกำหนดให้มีการซื้อแต่ยานพาหนะใหม่มาเปลี่ยนทดแทนเท่านั้น ถึงแม้ว่าการซื้อยานพาหนะที่ใช้แล้วแต่ยังมีอายุการใช้งานไม่มาก (อายุ 1-3 ปี) มาใช้อาจคุ้มค่ากว่า ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ยานพาหนะที่มีอายุการใช้งานไม่มาก มีต้นทุน O&M ใกล้เคียงกับยานพาหนะใหม่ ในขณะที่มีราคาซื้อต่ำกว่ามาก การที่ผู้ประกอบการนิยมนำนโยบาย PNOR มาใช้ อาจเกิดจากความเชื่อว่ายานพาหนะใหม่มีสมรรถนะที่สูงกว่า มีประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงที่ดีกว่า ทำให้งานจะมีต้นทุน O&M ต่อกิโลเมตรต่ำกว่ายานพาหนะเก่า นโยบาย PNOR สามารถแสดงได้ดังข้อจำกัดที่ (11)

$$b_{oij} = 0 \quad \forall o, \forall i > 0; \forall j < T \quad (11)$$

(2) นโยบายการตัดสินใจเก็บหรือเปลี่ยนทดแทนสินทรัพย์พร้อมกันทั้งหมด (No-splitting rule, NSR)

ในปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนแบบขนานที่มีสินทรัพย์เป็นเครื่องจักรนั้น มีนโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุด (Optimal policy) นโยบายหนึ่ง คือ “No-splitting rule” (NSR) ซึ่งกล่าวว่า “ในแต่ละช่วงเวลา กลุ่มเครื่องจักรแบบเดียวกันที่มีอายุเท่ากันควรถูกเก็บไว้หรือถูกเปลี่ยนทดแทนทั้งหมด โดยไม่มีการแบ่งขาย” นโยบายการเปลี่ยนทดแทนนี้ได้รับการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์แล้วว่าเป็นนโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุด โดยไม่จำเป็นต้องมีการ

กำหนดข้อสมมติด้านต้นทุน O&M และค่าขายซากแต่อย่างใด (Jones et al., 1991) แต่อย่างไรก็ตาม ในปัญหาการเปลี่ยนทดแทนแบบขนานของเครื่องจักรนั้น ปริมาณความต้องการใช้และจำนวนเครื่องจักรจะคงที่เสมอ ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่านโยบาย NSR เป็นนโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุดในกรณีที่ปริมาณความต้องการใช้และจำนวนสินทรัพย์คงที่ แต่ในปัญหาการเปลี่ยนทดแทนแบบขนานของกองยานพาหนะ ปริมาณความต้องการใช้และจำนวนยานพาหนะอาจไม่คงที่ทุกช่วงเวลา กล่าวคือ ผู้ประกอบการอาจตัดสินใจขายยานพาหนะเก่า n คันและซื้อยานพาหนะใหม่ m คัน โดยที่ n และ m อาจมีค่าไม่เท่ากันได้ ดังนั้น นโยบาย NSR ซึ่งเป็นนโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาการเปลี่ยนทดแทนแบบขนานของเครื่องจักร อาจไม่ใช่ในนโยบายที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาการเปลี่ยนทดแทนแบบขนานของกองยานพาหนะ และเมื่อนำนโยบาย NSR มาประยุกต์ใช้ในปัญหาการเปลี่ยนทดแทนแบบขนานของกองยานพาหนะ สามารถแยกออกเป็น 2 นโยบายย่อย คือ นโยบายการจำหน่ายยานพาหนะที่เหมือนกันพร้อมกันทั้งหมด (No-splitting-in-selling rule, NSSR) และนโยบายการซื้อยานพาหนะเพียงรูปแบบเดียวมาใช้งาน (One-purchase-choice rule, OPCR หรือ No-splitting-in-purchasing rule)

(2.1) นโยบายการจำหน่ายยานพาหนะที่เหมือนกันพร้อมกันทั้งหมด (No-splitting-in-selling rule, NSSR)

เมื่อนำนโยบายนี้มาใช้กับปัญหาการเปลี่ยนทดแทนแบบขนานของกองยานพาหนะ นโยบาย NSSR อาจมีกรณีที่เป็นไปได้ทั้งหมด 3 กรณี (ภาพที่ 3) คือ กรณีที่ 1 เมื่อกลุ่มของยานพาหนะเก่ารูปแบบหนึ่งๆ ที่อายุหนึ่งๆ ถูกจำหน่ายทั้งหมด กรณีที่ 2 เมื่อกลุ่มของยานพาหนะเก่ารูปแบบหนึ่งๆ ที่อายุหนึ่งๆ มีขนาดใหญ่ขึ้น กล่าวคือ มีการซื้อยานพาหนะเก่ารูปแบบเดียวกันที่อายุเดียวกันมาเพิ่ม และกรณีที่ 3 เมื่อกลุ่มของยานพาหนะเก่ารูปแบบหนึ่งๆ ที่อายุหนึ่งๆ มีขนาดเท่าเดิม (แต่มีอายุมากขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป) กล่าวคือ ไม่มีการซื้อ-การขายยานพาหนะ เมื่อนำนโยบาย NSSR มาใช้ สมดุลของจำนวนยานพาหนะในกองยานพาหนะตามข้อจำกัดที่ (4)-(5) จะถูกแทนด้วยข้อจำกัดที่ (12)-(26) เพื่อแทนกรณีที่เป็นไปได้ทั้ง 3 กรณี

กรณีที่ 1 จะถูกแสดงด้วยข้อจำกัดที่ (12)-(20) ดังนี้

$$b_{oij} \leq Mx_{oij} \quad \forall o; \forall i < N; \forall j < T \quad (12)$$

$$s_{oij} \leq Mz_{oij} \quad \forall o; \forall i > 0; \forall j \quad (13)$$

$$x_{oij} + z_{oij} \leq 1 \quad \forall o; \forall i > 0; \forall j \quad (14)$$

$$s_{oij} \leq h_{oi} \quad \forall o; \forall i > 0; j = 0 \quad (15)$$

$$h_{oi} - s_{oij} \leq M(1 - z_{oij}) \quad \forall o; \forall i > 0; j = 0 \quad (16)$$

$$s_{oij} \leq v_{o,i-1,j-1} \quad \forall o; \forall i > 0; \forall j > 0 \quad (17)$$

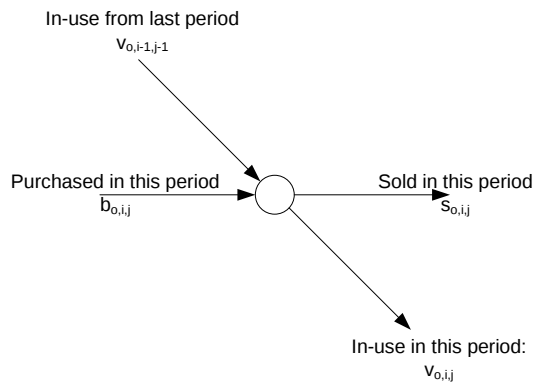
$$v_{o,i-1,j-1} - s_{oij} \leq M(1 - z_{oij}) \quad \forall o; \forall i > 0; \forall j > 0 \quad (18)$$

$$v_{oij} \leq M(1 - z_{oij}) \quad \forall o; \forall i > 0; \forall j \quad (19)$$

$$x_{oij}, z_{oij} \in \{0,1\} \quad \forall o; \forall i; \forall j \quad (20)$$

ข้อจำกัดที่ (12) และ (13) ทำให้ตัวแปรการตัดสินใจแบบ 0-1 x_{oij} และ z_{oij} มีค่าเป็น 1 เมื่อกลุ่มของยานพาหนะเก่ารูปแบบ o ที่อายุ i ถูกซื้อและถูกขายในช่วงเวลา j ตามลำดับ ข้อจำกัดที่ (14) บังคับให้ไม่สามารถขายยานพาหนะในกลุ่ม

เดียวกันถูกซื้อและขายพร้อมกันได้ ข้อจำกัดที่ (15)-(16) กำหนดว่ายานพาหนะในกลุ่มเดียวกันในกองยานพาหนะเริ่มต้นจะต้องถูกขายพร้อมกัน โดยไม่มีการแบ่งขาย เช่นเดียวกับในกองยานพาหนะในช่วงเวลาอื่นๆ ตามที่กำหนดในข้อจำกัดที่ (17)-(18) ข้อจำกัดที่ (19) กำหนดว่ายานพาหนะที่ขายไปแล้วจะต้องไม่มีเหลือใช้อยู่ในกองยานพาหนะ และข้อจำกัดที่ (20) แสดงถึงคุณสมบัติของตัวแปรการตัดสินใจแบบ 0-1 x_{oij} และ z_{oij} ที่เพิ่มเข้ามาในแบบจำลอง

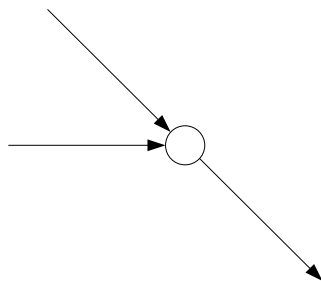


ก) สมดุลของจำนวนยานพาหนะ

$$v_{o,i-1,j-1} + b_{oij} = v_{oij} + s_{oij}$$

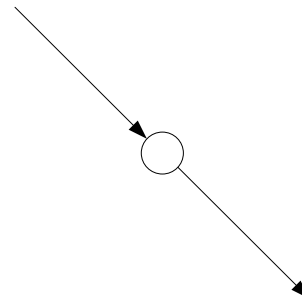
ข) กรณีที่ 1 เมื่อกลุ่มของยานพาหนะเก่าถูกจำหน่ายทิ้งทั้งหมด

$$v_{o,i-1,j-1} = s_{oij} ; b_{oij} = 0 ; v_{oij} = 0$$



ค) กรณีที่ 2 เมื่อกลุ่มของยานพาหนะเก่ามีขนาดใหญ่ขึ้น

$$v_{o,i-1,j-1} + b_{oij} = v_{oij} ; s_{oij} = 0$$



ง) กรณีที่ 3 เมื่อกลุ่มของยานพาหนะเก่า มีขนาดเท่าเดิม

$$v_{o,i-1,j-1} = v_{oij} ; b_{oij} = 0 ; s_{oij} = 0$$

ภาพที่ 3 สมดุลของจำนวนยานพาหนะในกองยานพาหนะ เมื่อใช้นโยบาย NSSR

กรณีที่ 2 เมื่อกลุ่มของยานพาหนะเก่ารูปแบบหนึ่งๆ ที่อายุหนึ่งๆ มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากการซื้อยานพาหนะเก่ารูปแบบเดียวกันที่อายุเดียวกันมาเพิ่ม สามารถแสดงได้ดังในข้อจำกัดที่ (21)-(24) หากมีการซื้อยานพาหนะมาเพิ่มแล้ว (นั่นคือ ตัวแปร x_{oij} มีค่าเป็น 1) ข้อจำกัดที่ (21)-(22) จะรักษาสมดุลของจำนวนยานพาหนะในกองยานพาหนะเริ่มต้น ขณะที่ข้อจำกัดที่ (23)-(24) จะรักษาสมดุลของจำนวนยานพาหนะในกองยานพาหนะในช่วงเวลาอื่นๆ

$$h_{oi} + b_{oij} - v_{oij} \leq M(1 - x_{oij}) \quad \forall o; \forall i < N; \forall j = 0 \quad (21)$$

$$v_{oij} \leq h_{oi} + b_{oij} \quad \forall o; \forall i < N; \forall j = 0 \quad (22)$$

$$v_{o,i-1,j-1} + b_{oij} - v_{oij} \leq M(1 - x_{oij}) \quad \forall o; \forall i < N; \forall 0 < j < T \quad (23)$$

$$v_{oij} \leq v_{o,i-1,j-1} + b_{oij} \quad \forall o; \forall i < N; \forall 0 < j < T \quad (24)$$

กรณีนี้ 3 เมื่อกลุ่มของยานพาหนะเฝ้ารูปแบบหนึ่งๆ ที่อายุหนึ่งๆ มีขนาดเท่าเดิม (แต่มีอายุมากขึ้น) เนื่องจากไม่มีการซื้อขายยานพาหนะในกลุ่มนี้ ในกรณีนี้ อาจไม่จำเป็นต้องกำหนดข้อจำกัดเพิ่ม เนื่องจากข้อจำกัดที่ (2) ซึ่งเป็นข้อจำกัดด้านปริมาณความต้องการใช้ยานพาหนะจะทำให้ข้อจำกัดที่ (22) และ (24) อยู่ขอบเขต (Boundaries) เมื่อมีการใช้ยานพาหนะกลุ่มนั้นๆ แต่เพื่อให้มั่นใจในความถูกต้องของแบบจำลอง เมื่อมีการใช้นโยบาย NSSR ผู้วิจัยจึงได้เพิ่มข้อจำกัดที่ (25) และ (26) เข้าไปในแบบจำลองด้วย โดยข้อจำกัดที่ (25) และ (26) จะรักษาสมดุลของจำนวนยานพาหนะในกองยานพาหนะเริ่มต้นและกองยานพาหนะในช่วงเวลาอื่นๆ ตามลำดับ เมื่อไม่มีการซื้อขายยานพาหนะกลุ่มนั้นๆ (นั่นคือตัวแปร x_{oij} และ z_{oij} มีค่าเป็น 0)

$$h_{oi} - v_{oij} \leq M(x_{oij} + z_{oij}) \quad \forall o; \forall i; j = 0 \quad (25)$$

$$v_{o,i-1,j-1} - v_{oij} \leq M(x_{oij} + z_{oij}) \quad \forall o; \forall i; j > 0 \quad (26)$$

(2.2) นโยบายการซื้อยานพาหนะเพียงรูปแบบเดียวมาใช้งาน (One-purchase-choice rule, OPCR)

นโยบายการซื้อยานพาหนะเพียงรูปแบบเดียวมาใช้งาน (One-purchase-choice rule, OPCR) เปรียบเสมือนนโยบายย่อยหนึ่งของ NSR (No-splitting rule) ในปัญหาการเปลี่ยนทดแทนเครื่องจักร โดยพิจารณาในแง่การซื้อสินทรัพย์ (No-splitting-in-purchasing rule) ในขณะที่นโยบาย NSSR (No-splitting-in-selling rule) พิจารณาในแง่การขายสินทรัพย์ นโยบาย OPCR สามารถแสดงได้ดังข้อจำกัดที่ (27) โดยใช้ร่วมกับข้อจำกัดที่ (12) นั่นคือ กำหนดให้มีตัวแปร x_{oij} เพียงตัวเดียวเท่านั้นที่จะมีค่าเป็น 1 ได้

$$\sum_{i=0}^N \sum_{o=1}^O x_{oij} \leq 1 \quad \forall j < T \quad (27)$$

(3) การจำหน่ายยานพาหนะที่เก่ากว่าก่อน (Older-vehicles-selling rule, OVSR)

นโยบายการเปลี่ยนทดแทนนี้มาจากนโยบายการเปลี่ยนทดแทนกลุ่มสินทรัพย์ที่เก่ากว่า “Older cluster replacement rule” (OCRR) ในปัญหาการเปลี่ยนทดแทนแบบขนานของเครื่องจักร และเป็นนโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาดังกล่าวด้วย (Hopp et al., 1993) นโยบายการเปลี่ยนทดแทนนี้สอดคล้องกับสิ่งที่นิยมปฏิบัติกันจริงอยู่แล้ว กล่าวคือ ผู้ประกอบการมักจะตัดสินใจเลือกเปลี่ยนสินทรัพย์ที่เก่ากว่าก่อนการเปลี่ยนทดแทนสินทรัพย์ที่ใหม่กว่า นโยบาย OCRR เป็นนโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้ข้อสมมติว่า (1) ต้นทุน O&M ไม่มีการลดลงเมื่ออายุการใช้งานเพิ่มขึ้น ตลอดทุกช่วงอายุ ซึ่งแสดงว่าอัตราการใช้งานของสินทรัพย์ที่พิจารณานั้นคงที่เสมอ ทำให้ต้นทุน O&M ของ

สินทรัพย์ที่ใหม่กว่าต่ำกว่าต้นทุน O&M ของสินทรัพย์ที่เก่า (2) ค่าขายซากไม่มีการเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการใช้งานเพิ่มขึ้น ตลอดทุกช่วงอายุ และ (3) ผลรวมของต้นทุน O&M และค่าขายซากไม่มีการลดลงเมื่ออายุการใช้งานเพิ่มขึ้น ตลอดทุกช่วงอายุ ยกเว้นในช่วงเวลาเริ่มต้น (ช่วงเวลาที่ 0) ซึ่งอาจกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า การเพิ่มขึ้นของต้นทุน O&M ตามอายุการใช้งานมีผลมากกว่าหรืออย่างน้อยเท่ากับการลดลงของค่าขายซากตามอายุการใช้งาน แต่ข้อสมมติเหล่านี้อาจไม่เป็นจริงในกรณีของการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนของกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือแบบขนาน โดยเฉพาะเมื่อรูปแบบการใช้งานเป็นไปตามความพึงพอใจของผู้ใช้ ซึ่งผู้ใช้จะนิยมใช้ยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือที่ใหม่กว่ามากกว่า ทำให้นโยบาย OVSR (สำหรับกรณีที่สินทรัพย์เป็นยานพาหนะ หรืออาจเป็นอุปกรณ์เครื่องมืออื่นๆ ที่มีผลของความพึงพอใจของผู้ใช้เข้ามาเกี่ยวข้อง) อาจไม่ใช่นโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุดในกรณีนี้ นโยบาย OVSR ที่พิจารณานี้ จะพิจารณาขาย (เปลี่ยนทดแทน) ยานพาหนะที่เก่ากว่าก่อน โดยไม่จำเป็นต้องขายทั้งกลุ่มพร้อมกันทั้งหมด ข้อจำกัด (28)-(30) แสดงถึงนโยบาย OVSR ในแบบจำลองคณิตศาสตร์

$$v_{oij} \leq My_{oij} \quad \forall o; \forall i < N; \forall j < T \quad (28)$$

$$\sum_{i'=0}^{i-1} s_{o,i',j} \leq M(1 - y_{oij}) \quad \forall o; \forall i < N; \forall j < T \quad (29)$$

$$y_{oij} \in \{0,1\} \quad \forall o; \forall i; \forall j \quad (30)$$

ข้อจำกัดที่ (28) ทำให้ตัวแปร 0-1 y_{oij} มีค่าเป็น 1 เมื่อมีการใช้ยานพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิงชนิด o อายุ i ปีในกองยานพาหนะในช่วงเวลา j ข้อจำกัดที่ (29) นำตัวแปร y_{oij} มาใช้เพื่อให้ไม่สามารถขายยานพาหนะที่ใหม่กว่าได้ ข้อจำกัดที่ (30) แสดงถึงคุณสมบัติของตัวแปรการตัดสินใจแบบ 0-1 y_{oij} ที่เพิ่มเข้ามาในแบบจำลอง

ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือแบบขนาน จากภาพที่ 2 จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณารูปแบบการใช้งานเป็นไปตามความพึงพอใจของผู้ใช้ ต้นทุน O&M จะมีการลดลง เมื่ออายุการใช้งานเพิ่มขึ้น แต่ต้นทุน O&M รวมอาจไม่ใช่พารามิเตอร์ที่สำคัญ พารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ ต้นทุน O&M ต่อกิโลเมตร หากต้นทุน O&M ต่อกิโลเมตรไม่มีการลดลงเมื่ออายุการใช้งานเพิ่มขึ้น ตลอดทุกช่วงอายุ แสดงว่าต้นทุน O&M ต่อกิโลเมตรของสินทรัพย์ที่ใหม่กว่าจะต่ำกว่าต้นทุน O&M ของสินทรัพย์ที่เก่า ทำให้การใช้สินทรัพย์ที่ใหม่กว่าคุ้มค่ากว่า และส่งผลให้นโยบาย OVSR เป็นนโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุด แต่หากต้นทุน O&M ต่อกิโลเมตรไม่เป็นไปตามข้อสมมติ (กล่าวคือ มีการลดลงเมื่ออายุการใช้งานเพิ่มขึ้น) นโยบาย OVSR ก็จะไม่ใช่นโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุด

(4) นโยบายการตัดสินใจเปลี่ยนทดแทนทั้งหมดหรือไม่เปลี่ยนทดแทนเลย (All-or-none rule, AONR)

นโยบายการตัดสินใจเปลี่ยนทดแทนทั้งหมดหรือไม่เปลี่ยนทดแทนเลย (All-or-none rule, AONR) คือ นโยบายการเปลี่ยนทดแทนสินทรัพย์ทั้งหมดพร้อมกัน ในช่วงเวลาหนึ่งๆ โดยไม่คำนึงถึงอายุการใช้งานของสินทรัพย์ นโยบายนี้เป็นนโยบายที่ไม่นิยมใช้กันนักในทางปฏิบัติ แต่ได้มีการพิสูจน์ในทางคณิตศาสตร์แล้วว่า นโยบายนี้เป็นนโยบายที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาการเปลี่ยนทดแทนแบบขนานของเครื่องจักร ภายใต้ข้อสมมติของต้นทุน O&M และค่าขายซากเช่นเดียวกับในนโยบาย OCRR ยกเว้นในข้อสมมติที่ (3) ซึ่งในกรณีนี้ ผลรวมของต้นทุน O&M และค่าขายซากจะต้องไม่มีการลดลงเมื่ออายุการใช้งานเพิ่มขึ้น ตลอดทุกช่วงอายุการใช้งาน รวมทั้งในช่วงเวลาเริ่มต้น (ช่วงเวลาที่ 0) ด้วย ข้อสมมติ

ของผลรวมของต้นทุน O&M และค่าขายซากนี้จะเป็นจริงเฉพาะเมื่อค่าขายซากในแต่ละช่วงเวลามีค่าไม่มากไปกว่าต้นทุน O&M ในช่วงเวลาเดียวกัน ซึ่งยากที่จะเป็นจริงได้ในกรณีของปัญหาการเปลี่ยนทดแทนแบบขนานของกองยานพาหนะ เพราะยานพาหนะมักจะมีการเสื่อมมูลค่าอย่างรวดเร็วในช่วงแรกๆ (ช่วงอายุการใช้งาน 1-3 ปีแรก) ขณะที่ต้นทุน O&M ของยานพาหนะในช่วงอายุดังกล่าวจะมีค่าไม่สูงมากนัก

หากนำนโยบาย AONR มาใช้ในการเปลี่ยนทดแทนแบบขนานของกองยานพาหนะ นโยบายนี้จะกำหนดให้มีการขายยานพาหนะทั้งหมดถึงเมื่อสิ้นช่วงเวลาการตัดสินใจแต่ละช่วง แล้วซื้อยานพาหนะที่สามารถตอบสนองต่อปริมาณความต้องการใช้ในช่วงเวลาถัดไปได้รวมทั้งมีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ที่สุดมาใช้แทน ยกเว้นเฉพาะในกรณีที่ยานพาหนะที่มีอยู่ในกองยานพาหนะเป็นยานพาหนะที่สามารถตอบสนองต่อปริมาณความต้องการใช้ในช่วงเวลาถัดไปได้รวมทั้งมีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ที่สุดอยู่แล้ว นโยบาย AONR แสดงได้ดังในข้อจำกัดที่ (31)-(32) ซึ่งบังคับให้มีการขายยานพาหนะทั้งหมดถึงเมื่อสิ้นช่วงเวลาการตัดสินใจแต่ละช่วง ทั้งในช่วงเวลาเริ่มต้นและช่วงเวลาอื่นๆ ตลอดระยะเวลาวางแผน

$$h_{o,i} = s_{oij} \quad \forall o; \forall i < N; \forall j < T \quad (31)$$

$$v_{o,i-1,j-1} = s_{oij} \quad \forall o; \forall i < N; \forall j < T \quad (32)$$

การทดสอบแก้ปัญหาการเปลี่ยนทดแทนแบบขนานของกองยานพาหนะ

ในส่วนนี้ ผู้วิจัยได้แสดงการทดสอบแก้ปัญหาการเปลี่ยนทดแทนแบบขนานของกองยานพาหนะ เพื่อหากำหนดการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้สถานการณ์ต่างๆ และทำการทดสอบผลของการใช้นโยบายการเปลี่ยนทดแทนต่างๆ ต่อต้นทุนค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ คือ ส่วนที่ 1 แสดงการทดสอบปัญหาขนาดเล็ก ซึ่งใช้ค่าสมมติของพารามิเตอร์ในตัวอย่างปัญหาทดสอบ เพื่อทดสอบผลของการใช้นโยบายการเปลี่ยนทดแทนต่างๆ ภายใต้รูปแบบการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ หลายรูปแบบ และส่วนที่ 2 แสดงการทดสอบปัญหาขนาดใหญ่ซึ่งใช้ค่าพารามิเตอร์จริงหรือค่าประมาณจากข้อมูลจริงที่ได้รับรวบรวมจากผู้ประกอบการและแหล่งข้อมูลอื่นๆ ในปัญหาทดสอบ

ปัญหาการเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะแบบขนานขนาดเล็กที่มีระยะเวลาวางแผนสั้น

ในปัญหาทดสอบขนาดเล็กของปัญหาการเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะแบบขนานที่มีระยะเวลาวางแผนสั้นนี้ กองยานพาหนะเริ่มต้นประกอบด้วยกลุ่มยานพาหนะโมเดลเดียว 5 กลุ่มซึ่งมีอายุ 1, 3, 5, 7 และ 9 ปี หรืออีกนัยหนึ่งคือ กองยานพาหนะนี้มีการตัดสินใจเปลี่ยนทดแทนยานพาหนะในรอบ 2 ปี โดยตัดสินใจเปลี่ยนทดแทนยานพาหนะเก่าด้วยยานพาหนะใหม่เท่านั้น แต่ละกลุ่มยานพาหนะมียานพาหนะจำนวน 3 คัน ซึ่งมีอายุการใช้งานสูงสุดเท่ากับ 10 ปี ใช้อัตราคิดลด (Discount factor) ร้อยละ 5 ยานพาหนะใหม่มีราคา 1,000,000 บาทต่อคัน และไม่มีข้อกำหนดด้านอายุของยานพาหนะที่จะซื้อหรือขาย กำหนดระยะเวลาวางแผนเท่ากับ 3 ปี แต่ละปีมีปริมาณความต้องการใช้คงที่ ปัจจุบันที่นำมาพิจารณาประกอบด้วย ค่าขายซาก ต้นทุน O&M ต่อกิโลเมตร และอัตราการใช้งาน (Utilization rate) โดยแต่ละปีจะมีรูปแบบที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบ ดังที่แสดงในตารางที่ 1 ดังนั้น จึงมีสถานการณ์ที่เป็นไปได้ของปัญหาทดสอบขนาดเล็กนี้อยู่ 8 สถานการณ์ ดังที่แสดงในตารางที่ 2-ก โดยที่สถานการณ์ที่ 8 จะใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

ตารางที่ 1 รูปแบบของค่าขายซาก ต้นทุน O&M ต่อกิโลเมตร และอัตราการใช้งาน

อายุการใช้งาน	ค่าขายซาก				ต้นทุน O&M ต่อกิโลเมตร		อัตราการใช้งาน	
	เชิงเส้น	ร้อยละของการลด	เชิงประจักษ์	ร้อยละของการลด	คงที่	เชิงประจักษ์	คงที่	ตามความพึงพอใจของผู้ใช้
0	1,000,000	-	1,000,000	-	3	3.44	20,000	20,000
1	946,315	5.37%	910,000	9.00%	3	3.53	20,000	20,000
2	892,630	5.37%	830,000	8.00%	3	4.75	20,000	20,000
3	838,945	5.37%	820,000	1.00%	3	3.75	20,000	20,000
4	785,260	5.37%	630,000	19.00%	3	4.81	20,000	18,000
5	731,575	5.37%	620,000	1.00%	3	3.82	20,000	16,000
6	677,890	5.37%	600,000	2.00%	3	3.73	20,000	14,000
7	624,205	5.37%	590,000	1.00%	3	4.91	20,000	12,000
8	570,520	5.37%	580,000	1.00%	3	3.83	20,000	10,000
9	516,835	5.37%	510,000	7.00%	3	5.02	20,000	8,000
10	463,150	5.37%	330,000	18.00%	3	4.05	0	0

ในที่นี้ สมมติให้รูปแบบการลดของค่าขายซากแบบเชิงเส้นมีการลดลง 53,685 บาทต่อปี ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการประมาณด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นจากชุดข้อมูลจริงของยานพาหนะโมเดลหนึ่งที่มีอายุแตกต่างกันจำนวน 205 คัน ($p\text{-value} < 0.0001$ และ $R^2 = 90.5\%$) รูปแบบการลดของค่าขายซากแบบเชิงเส้นถูกนำมาพิจารณาเพื่อวิเคราะห์ผลของการใช้การเสื่อมมูลค่าแบบเชิงเส้นต่อการตัดสินใจเปลี่ยนทดแทนยานพาหนะ สำหรับรูปแบบการลดของค่าขายซากแบบเชิงประจักษ์ (Empirical pattern) ได้ประมาณมาจากข้อมูลชุดเดียวกัน โดยใช้ค่าเฉลี่ยของค่าขายซากของยานพาหนะโมเดลเดียวกันที่แต่ละอายุการใช้งานเป็นราคาขายซากของยานพาหนะที่อายุนั้นๆ เมื่อแสดงค่าในรูปของร้อยละของราคาขายซากเปรียบเทียบกับราคาเริ่มต้น พบว่า ในรูปแบบการลดของค่าขายซากแบบเชิงประจักษ์ ราคาขายซากจะลดประมาณร้อยละ 9 และร้อยละ 8 ในช่วง 2 ปีแรก จากนั้นจะลดลงเพียงเล็กน้อยในปีที่ 3 (ประมาณร้อยละ 1) แล้วลดลงอย่างรวดเร็ว (ประมาณร้อยละ 19) ในปีี่ 4 จากนั้นจึงลดลงเล็กน้อย (ร้อยละ 1-2) ในช่วงอายุ 5-8 ปี สำหรับในปีที่ 9 และ 10 ราคาขายซากจะลดประมาณร้อยละ 7 และร้อยละ 18 ตามลำดับ ซึ่งรูปแบบนี้แสดงให้เห็นว่ายานพาหนะมีรูปแบบการเสื่อมมูลค่าอย่างรวดเร็วแล้วคงที่อยู่ประมาณ 2-3 รอบตลอดอายุการใช้งาน การลดลงของค่าขายซากอย่างรวดเร็วในบางช่วงอายุนั้น เป็นผลมาจากการที่ผู้ใช้นิยมเปลี่ยนรูปแบบการทำการประกันรถยนต์ในปีที่ 3 ของการใช้งาน และความเชื่อเกี่ยวกับสมรรถนะของยานพาหนะที่ช่วงอายุที่แตกต่างกัน เช่น ผู้ใช้มักรู้สึกว่ายานพาหนะอายุ 1-3 ปียังไม่เก่าเกินไปนัก ขณะที่ยานพาหนะอายุ 4-8 ปีจัดว่าค่อนข้างเก่า และยานพาหนะอายุ 9-10 ปีเป็นยานพาหนะที่เก่ามาก ควรขายทิ้ง

สำหรับต้นทุน O&M ต่อกิโลเมตร สมมติให้ครั้งที่ 3 บาทต่อกิโลเมตร หรือมีรูปแบบเชิงประจักษ์ซึ่งการเพิ่มขึ้นของต้นทุน O&M ต่อกิโลเมตรตามการเสื่อมสมรรถนะของยานพาหนะจะสูงเมื่ออายุการใช้งานของยานพาหนะเท่ากับ 2, 4, 7 และ 9 ปี อันเป็นผลมาจากการที่ยานพาหนะถึงรอบการซ่อมบำรุงตามที่บริษัทผู้ผลิตได้กำหนดไว้ สำหรับอัตราการใช้งานในกรณีที่อัตราการใช้งานคงที่ จะสมมติให้มีการใช้งานเท่ากับ 20,000 กิโลเมตรต่อปี ส่วนในกรณีที่อัตราการใช้งานมีรูปแบบตามความพึงพอใจของผู้ใช้ จะสมมติให้ยานพาหนะมีการใช้งานคงที่ในช่วง 4 ปีแรกแล้วลดลง 2,000 กิโลเมตรต่ออายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น 1 ปี ตามความพึงพอใจของผู้ใช้ที่นิยมใช้ยานพาหนะใหม่มากกว่า

สำหรับสถานการณ์ที่เป็นไปได้ของปัญหาทดสอบขนาดเล็กแต่ละสถานการณ์ (ตารางที่ 2-ก) ผู้วิจัยได้ทดสอบกับปัญหาเพื่อกำหนดการการเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะที่เหมาะสมที่สุด รวมทั้งสำรวจว่าสอดคล้องกับนโยบายการเปลี่ยนทดแทนใดบ้าง ประสิทธิภาพของนโยบายการเปลี่ยนทดแทนแต่ละนโยบายวัดด้วยร้อยละของการเพิ่มขึ้นของต้นทุนรวมจากค่าที่ดีที่สุด (The off-optimal percentage) เมื่อบังคับใช้นโยบายการเปลี่ยนทดแทนนั้นๆ ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ ผลการทดสอบแสดงได้ดังในตารางที่ 2 จะสังเกตได้ว่าต้นทุนรวม (Objective function values) ในที่นี้เป็นลบ เนื่องจากยานพาหนะทั้งหมดถูกขายทิ้งเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาวางแผนสั้นๆ ที่ได้กำหนดไว้ ทำให้บริษัทมีกระแสเงินสดเป็นบวกจากรายได้จากการขายซากที่ช่วงเวลาสุดท้าย

ตารางที่ 2* ผลการคำนวณจากปัญหาทดสอบขนาดเล็ก

ก) สถานการณ์ที่พิจารณา

ลำดับที่	ค่ายาซาก	ต้นทุน O&M	อัตราการใช้งาน	ความต้องการใช้
1	เชิงเส้น	คงที่	คงที่	300,000
2	เชิงเส้น	คงที่	ตามความพึงพอใจ	228,000
3	เชิงเส้น	เชิงประจักษ์	คงที่	300,000
4	เชิงเส้น	เชิงประจักษ์	ตามความพึงพอใจ	228,000
5	เชิงประจักษ์	คงที่	คงที่	300,000
6	เชิงประจักษ์	คงที่	ตามความพึงพอใจ	228,000
7	เชิงประจักษ์	เชิงประจักษ์	คงที่	300,000
8	เชิงประจักษ์	เชิงประจักษ์	ตามความพึงพอใจ	228,000

ข) กรณีฐาน

ลำดับที่	OPCR	OVSR	NSSR	AONR	ต้นทุนรวม
1	Y	N	Y	N(1)	(5,274,136)
2	N(2)	N	N(1)	N(1)	(6,029,619)
3	Y	N	Y	Y	(4,484,124)
4	N(2)	N	Y	N(1)	(5,567,627)
5	Y	N	Y	N(1)	(6,285,552)
6	N(2)	N	N(1)	N(1)	(7,023,553)
7	Y	N	Y	Y	(5,672,504)
8	N(2)	N	Y	Y	(6,236,617)

ค) บังคับใช้ PNOR (The purchase-new-only rule)

ลำดับที่	OPCR	OVSR	NSSR	AONR	ต้นทุนรวม	%-off.opt
1	-	Y	Y	Y	(4,799,023)	9.01%
2	-	Y	N(1)	N	(5,931,564)	1.63%
3	-	N	Y	N	(3,995,164)	10.90%
4	-	N	N(1)	N	(5,498,064)	1.25%
5	-	N	Y	N	(4,185,659)	33.41%
6	-	N	N(2)	N	(5,257,707)	25.14%
7	-	N	Y	N	(3,385,302)	40.32%
8	-	N	N(1)	N	(4,718,954)	24.33%

ง) บังคับใช้ OPCR (The one-purchase-choice rule)

ลำดับที่	OPCR	OVSR	NSSR	AONR	ต้นทุนรวม	%-off.opt
1	-	N	Y	N(1)	(5,274,136)	optimal
2	-	N	N(1)	N	(6,029,619)	optimal
3	-	N	Y	Y	(4,484,124)	optimal
4	-	N	N(1)	N	(5,538,030)	0.53%
5	-	N	Y	N(1)	(6,285,552)	optimal
6	-	N	N(1)	N	(6,996,622)	0.38%
7	-	N	Y	Y	(5,672,504)	optimal
8	-	N	N(1)	N(1)	(6,133,426)	1.65%

จ) บังคับใช้ OVSR (The older-vehicle-selling rule)

ลำดับที่	OPCR	OVSR	NSSR	AONR	ต้นทุนรวม	%-off.opt
1	Y	-	Y	N	(4,920,410)	6.71%
2	N(2)	-	Y	N	(6,006,976)	0.38%
3	Y	-	Y	N	(4,095,679)	8.66%
4	Y	-	Y	N(1)	(5,431,081)	2.45%
5	Y	-	Y	N(1)	(5,583,939)	11.16%
6	Y	-	Y	N(1)	(6,494,866)	7.53%
7	Y	-	Y	N	(4,290,347)	24.37%
8	N(2)	-	Y	Y	(5,419,762)	13.10%

ฉ) บังคับใช้ NSSR (The no-splitting-in-selling rule)

ลำดับที่	OPCR	OVSR	NSSR	AONR	ต้นทุนรวม	%-off.opt
1	Y	N	-	N(1)	(5,274,136)	optimal
2	N(2)	N	-	N	(6,029,619)	optimal
3	Y	N	-	Y	(4,484,124)	optimal
4	N(2)	N	-	N(1)	(5,567,627)	optimal
5	Y	N	-	N(1)	(6,285,552)	optimal
6	N(2)	N	-	N	(7,017,362)	0.09%
7	Y	N	-	Y	(5,672,504)	optimal
8	N(2)	N	-	Y	(6,236,617)	optimal

ช) บังคับใช้ AONR (The all-or-none rule)

ลำดับที่	OPCR	OVSR	NSSR	AONR	ต้นทุนรวม	%-off.opt
1	Y	-	-	-	(5,274,136)	optimal
2	Y	-	-	-	(6,029,619)	optimal
3	Y	-	-	-	(4,484,124)	optimal
4	N(2)	-	-	-	(5,567,627)	optimal
5	Y	-	-	-	(6,285,552)	optimal
6	N(2)	-	-	-	(7,023,553)	optimal
7	Y	-	-	-	(5,672,504)	optimal
8	N(2)	-	-	-	(6,236,617)	optimal

ซ) บังคับใช้ทั้ง 4 นโยบาย: PNOR, OPCR, OVSR, NSSR

ลำดับที่	OPCR	OVSR	NSSR	AONR	ต้นทุนรวม	%-off.opt
1	-	-	-	N	(4,799,023)	9.01%
2	-	-	-	N	(5,902,948)	2.10%
3	-	-	-	N	(3,965,388)	11.57%
4	-	-	-	N	(5,415,567)	2.73%
5	-	-	-	N	(3,919,699)	37.64%
6	-	-	-	N	(4,902,864)	30.19%
7	-	-	-	N	(3,064,253)	45.98%
8	-	-	-	N	(4,320,803)	30.72%

หมายเหตุ: 1) Y หมายถึง สอดคล้องกับนโยบายนั้นๆ; N หมายถึง ไม่สอดคล้องกับนโยบายนั้นๆ

2) ในสมมติของ OPCR, N(2) หมายถึง ไม่สอดคล้องกับนโยบาย OPCR เนื่องจากมีการซื้อขายยานพาหนะที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบ

3) ในสมมติของ NSSR, N(k) หมายถึง ไม่สอดคล้องกับนโยบาย NSSR เนื่องจากมีการแบ่งขายยานพาหนะ k กลุ่ม

4) ในสมมติของ AONR, N(1) หมายถึง ไม่สอดคล้องกับนโยบาย AONR ในช่วงเวลาที่ 1

* เนื่องจากนโยบาย PNOR จะไม่สอดคล้องกับผลในสถานการณ์ใดๆ หากไม่มีการบังคับใช้ ในที่นี้จึงไม่แสดงนโยบายดังกล่าวในตาราง

กรณีฐาน ผลของกรณีฐานเป็นผลจากการกำหนดการในการเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะที่เหมาะสมที่สุด เมื่อไม่มีการบังคับใช้นโยบายการเปลี่ยนทดแทนใดๆ (ตารางที่ 2-ข) ซึ่งพบว่านโยบาย PNOR และ OVSR ไม่สอดคล้องกับสถานการณ์ใดๆ เลย ในขณะที่นโยบาย OPCR และ NSSR จะเหมาะสมเมื่ออัตราการใช้งานคงที่ (สถานการณ์ที่ 1, 3, 5 และ 7) นโยบาย AONR จะเหมาะสมในเกือบทุกสถานการณ์ ยกเว้นในช่วงเวลาที่ 1 ของสถานการณ์ที่ 1, 2, 4, 5 และ 6 (ซึ่งเป็นผลมาจากกองยานพาหนะเริ่มต้น) ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่ารูปแบบอัตราการใช้งานคงที่ (ในสถานการณ์ที่ 1, 3, 5 และ 7) มีต้นทุนรวมสูงกว่ารูปแบบอัตราการใช้งานเป็นไปตามความพึงพอใจของผู้ใช้ (ในสถานการณ์ที่ 2, 4, 6 และ 8) ทั้งนี้

เนื่องจากรถยนต์ที่ใหม่กว่าจะมีประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงดีกว่าและถูกใช้งานมากกว่าในกรณีที่อัตราการใช้งานเป็นไปตามความพึงพอใจของผู้ใช้

นโยบายการเปลี่ยนทดแทน เมื่อทดสอบบังคับใช้นโยบายการเปลี่ยนทดแทนทั้งห้าที่ละนโยบายในแบบจำลองคณิตศาสตร์ของปัญหาทดสอบขนาดเล็กนี้ ในตารางที่ 2-ค ซึ่งแสดงผลของการบังคับใช้นโยบาย PNOR จะเห็นว่า เมื่อใช้รูปแบบการเสื่อมราคาแบบเส้นตรง ร้อยละของการเพิ่มขึ้นของต้นทุนรวมจากค่าที่ดีที่สุดจะมีค่าต่ำ หากรูปแบบอัตราการใช้งานเป็นไปตามความพึงพอใจของผู้ใช้ (ในสถานการณ์ที่ 2 และ 4) และมีค่าปานกลาง หากรูปแบบอัตราการใช้งานเป็นแบบคงที่ (ในสถานการณ์ที่ 1 และ 3) แต่เมื่อใช้รูปแบบการเสื่อมราคาตามจริง (สถานการณ์ที่ 5-8) ร้อยละของการเพิ่มขึ้นของต้นทุนรวมจากค่าที่ดีที่สุดจะสูงขึ้นมาก นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่า นโยบาย PNOR เป็นนโยบายที่ไม่เหมาะสม แม้แต่ในปัญหาทดสอบขนาดเล็กที่มีระยะเวลาวางแผนสั้น นโยบาย OVSR (ตารางที่ 2-จ) ก็ให้ผลในทำนองเดียวกัน แต่จะมีร้อยละของการเพิ่มขึ้นของต้นทุนรวมจากค่าที่ดีที่สุดไม่มากเท่ากับผลจากการบังคับใช้นโยบาย PNOR นอกจากนี้ จะสังเกตได้ว่า เมื่อมีการใช้นโยบาย OVSR แล้ว นโยบาย NSSR จะเป็นนโยบายที่เหมาะสมในทุกสถานการณ์ที่พิจารณาไปด้วย ดังนั้น หากผู้ประกอบการต้องการเปลี่ยนทดแทนยานพาหนะเก่าก่อนแล้ว ควรจะขายยานพาหนะนั้นๆ ทั้งกลุ่ม โดยไม่แบ่งขายด้วย

นโยบาย OPCR (ตารางที่ 2-ง) เป็นนโยบายที่เหมาะสมใน 5 สถานการณ์จาก 8 สถานการณ์ โดยที่ในสถานการณ์ที่นโยบาย OPCR ไม่ใช่นโยบายที่เหมาะสม ร้อยละของการเพิ่มขึ้นของต้นทุนรวมจากค่าที่ดีที่สุดมีค่าไม่มากนัก (น้อยกว่าร้อยละ 2) แสดงให้เห็นว่า นโยบาย OPCR น่าจะเป็นนโยบายที่เหมาะสมในเชิงปฏิบัติ สำหรับนโยบาย NSSR (ตารางที่ 2-ฉ) พบว่าเป็นนโยบายที่เหมาะสมใน 7 สถานการณ์ โดยที่ในสถานการณ์ที่นโยบายนี้ไม่ใช่นโยบายที่เหมาะสมก็มีร้อยละของการเพิ่มขึ้นของต้นทุนรวมจากค่าที่ดีที่สุดต่ำ ดังนั้น นโยบาย NSSR ก็น่าจะเป็นนโยบายที่เหมาะสมในเชิงปฏิบัติเช่นกัน นอกจากนี้ สังเกตได้ว่า ในสถานการณ์ที่ 2 ต้นทุนรวมของกรณีฐานและกรณีที่มีการบังคับใช้ NSSR มีค่าเท่ากัน แต่กำหนดการเปลี่ยนทดแทนที่ได้ต่างกัน แสดงว่ามีกำหนดการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุดมากกว่า 1 แบบ

การที่นโยบาย NSSR ไม่ใช่นโยบายที่เหมาะสมที่สุดในสถานการณ์ที่ 6 น่าจะเป็นผลมาจากการที่การตัดสินใจเปลี่ยนทดแทนยานพาหนะขึ้นอยู่กับปริมาณความต้องการใช้อย่างมาก กล่าวคือ โดยทั่วไป ที่ระดับปริมาณความต้องการใช้หนึ่งๆ กลุ่มของยานพาหนะเก่าจะถูกขายทิ้ง หากพบว่าไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ ในแง่การตอบสนองต่อปริมาณความต้องการใช้ในช่วงเวลาที่เหลือ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มยานพาหนะอื่นๆ แต่ในบางครั้ง การแบ่งขายยานพาหนะอาจเกิดขึ้นได้ แม้ว่ากลุ่มของยานพาหนะถูกแบ่งขาย (Split-sold cluster) มีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์น้อยกว่ากลุ่มยานพาหนะอื่นๆ ที่เหลืออยู่ หากกลุ่มยานพาหนะที่ถูกแบ่งขายนั้นมีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์มากกว่ากลุ่มยานพาหนะใหม่ (อายุ 0 ปี) หรืออีกนัยหนึ่งคือ กลุ่มของยานพาหนะที่ถูกแบ่งขายจะถูกขายไปบางส่วนและเหลือจำนวนยานพาหนะไว้เพียงให้เพียงพอต่อการตอบสนองปริมาณความต้องการใช้ในส่วนที่ยังขาดเท่านั้น ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเรามีกลุ่มยานพาหนะที่ถูกแบ่งขายที่มีอายุการใช้งาน i อยู่ในกองยานพาหนะ และให้ $d_j(ss_i)$ แทนปริมาณความต้องการใช้ที่ยังขาดอยู่และสามารถตอบสนองได้ด้วยกลุ่มยานพาหนะที่ถูกแบ่งขายที่มีอายุการใช้งาน i ในช่วงเวลา j และ u_i แทนอัตราการใช้งานของยานพาหนะที่มีอายุการใช้งาน i จำนวนยานพาหนะที่เหลือในกลุ่มยานพาหนะที่ถูกแบ่งขายในกองยานพาหนะจะมีจำนวนเท่ากับ $\left\lceil \frac{d_j(ss_i)}{u_i} \right\rceil$ ซึ่งเป็นจำนวนยานพาหนะที่น้อยที่สุดที่จะสามารถตอบสนองต่อปริมาณความต้องการใช้ในส่วนที่ยังขาดใน

ช่วงเวลา j ได้ แต่ในบางกรณี อาจมีกำหนดการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุดที่สอดคล้องกับนโยบาย NSSR ได้เช่นกัน ซึ่งกรณีดังกล่าวจะเป็นกรณีที่การซื้อยานพาหนะใหม่มาใช้เพื่อตอบสนองปริมาณความต้องการใช้ส่วนที่ยังขาดมีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์มากกว่าการแบ่งขายกลุ่มยานพาหนะที่มีอยู่

สำหรับนโยบาย OPCR ก็จะคล้ายกับในกรณีการขายยานพาหนะ สมมติว่าเราพิจารณาการตัดสินใจซื้อยานพาหนะเพียง 2 รูปแบบมาใช้งาน คือ ยานพาหนะใหม่ (อายุ 0 ปี) b_0 และยานพาหนะอายุ 1 ปี b_1 สมมติว่ายานพาหนะใหม่ b_0 มีความคุ้มค่าที่จะตอบสนองต่อปริมาณความต้องการใช้มากกว่า และให้ $d_j(b_0)$ เป็นปริมาณความต้องการใช้ส่วนที่สามารถตอบสนองได้ด้วยกลุ่มยานพาหนะ b_0 ในช่วงเวลา j และ u_0 เป็นแทนอัตราการใช้งานของกลุ่มยานพาหนะ b_0 ถ้า $\frac{d_j(b_0)}{u_0}$ เป็นจำนวนเต็มหรือมีค่าใกล้เคียงกับเลขจำนวนเต็มมากจนกระทั่งสามารถปัดค่าขึ้นได้ จนทำให้การซื้อยานพาหนะใหม่จำนวน $\left\lceil \frac{d_j(b_0)}{u_0} \right\rceil$ คัน คุ้มค่า กำหนดการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุดก็จะสอดคล้องกับ OPCR กล่าวคือ มีการซื้อยานพาหนะเพียงรูปแบบเดียวมาใช้งาน แต่หาก $\frac{d_j(b_0)}{u_0}$ มีค่าไม่เป็นจำนวนเต็ม และไม่คุ้มค่าต่อการซื้อยานพาหนะใหม่จำนวน $\left\lceil \frac{d_j(b_0)}{u_0} \right\rceil$ คัน การซื้อยานพาหนะ 2 รูปแบบมาใช้งานก็จะคุ้มค่ากว่า (นั่นคือ นโยบาย OPCR ไม่เป็นจริง) โดยจะซื้อยานพาหนะใหม่จำนวน $\left\lfloor \frac{d_j(b_0)}{u_0} \right\rfloor$ คัน และซื้อยานพาหนะอายุ 1 ปีจำนวน 1 คันหรือมากกว่า เท่าที่จะสามารถตอบสนองต่อปริมาณความต้องการใช้ในส่วนที่ยังขาดได้ จากตัวอย่างที่ยกมานี้ ผู้วิจัยจึงเสนอว่า หากนโยบาย OPCR ไม่เป็นจริงแล้ว จำนวนรูปแบบของยานพาหนะที่ซื้อมาใช้งานในกำหนดการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุดจะมีได้อย่างมากเพียง 2 รูปแบบเท่านั้น

ในตารางที่ 2-ข แสดงถึงผลของการบังคับใช้ AONR ซึ่งตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ข้อสมมติของ AONR มักจะไม่เป็นจริงในปัญหาการเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะแบบขนาน ทำให้นโยบาย AONR ไม่น่าจะเหมาะสมกับปัญหานี้ แต่จากการทดสอบบังคับใช้ AONR ในปัญหาการเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะแบบขนานขนาดเล็ก พบว่าคำตอบที่ได้เป็นต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับต้นทุนรวมในกรณีฐาน แต่มีกำหนดการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุดแตกต่างกันเล็กน้อย (นั่นคือ ปัญหาที่มีคำตอบที่ดีที่สุดหลายคำตอบ) ดังนั้น นโยบาย AONR อาจเป็นนโยบายที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาการเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะแบบขนานนี้ก็ได้ ซึ่งจะต้องพิสูจน์ต่อไป

สำหรับตารางที่ 2-ข แสดงถึงผลของการบังคับใช้นโยบายทั้ง 4 นโยบายพร้อมกัน คือ PNOR, OPCR, OVSR และ NSSR พบว่ามีร้อยละของการเพิ่มขึ้นของต้นทุนรวมจากค่าที่ดีที่สุดคล้ายกับในกรณีที่นโยบาย PNOR ถูกบังคับใช้ แสดงให้เห็นว่า ร้อยละของการเพิ่มขึ้นของต้นทุนรวมจากค่าที่ดีที่สุดในตารางนี้น่าจะมีผลมากจากการบังคับใช้นโยบาย PNOR เป็นหลัก

ปัญหาการเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะแบบขนานขนาดใหญ่ที่มีระยะเวลาวางแผนยาว

ปัญหาทดสอบของปัญหาการเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะแบบขนานขนาดใหญ่ที่พิจารณานี้มีระยะเวลาวางแผนนานเท่ากับ 20 ปี โดยสมมติว่ามีองค์กรหนึ่งใช้ยานพาหนะ 2 แบบในการให้บริการลูกค้า คือ รถยนต์นั่งส่วนบุคคล (Sedans) และรถยนต์อเนกประสงค์ (Sport utility vehicles, SUVs) องค์กรสามารถประมาณปริมาณความต้องการใช้ยานพาหนะในแต่ละปีได้โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณความต้องการใช้ประมาณร้อยละ 5 ต่อปี จำนวนยานพาหนะเริ่มต้นและปริมาณความต้องการใช้เริ่มต้นแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 กองยานพาหนะเริ่มต้นและปริมาณความต้องการใช้เริ่มต้น

อายุ (ปี)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ความต้องการใช้
รถยนต์นั่งส่วนบุคคล	-	25	25	25	15	15	15	5	5	5	-	8,190,000 กิโลเมตร
รถยนต์อเนกประสงค์	-	25	25	25	15	15	15	5	5	5	-	

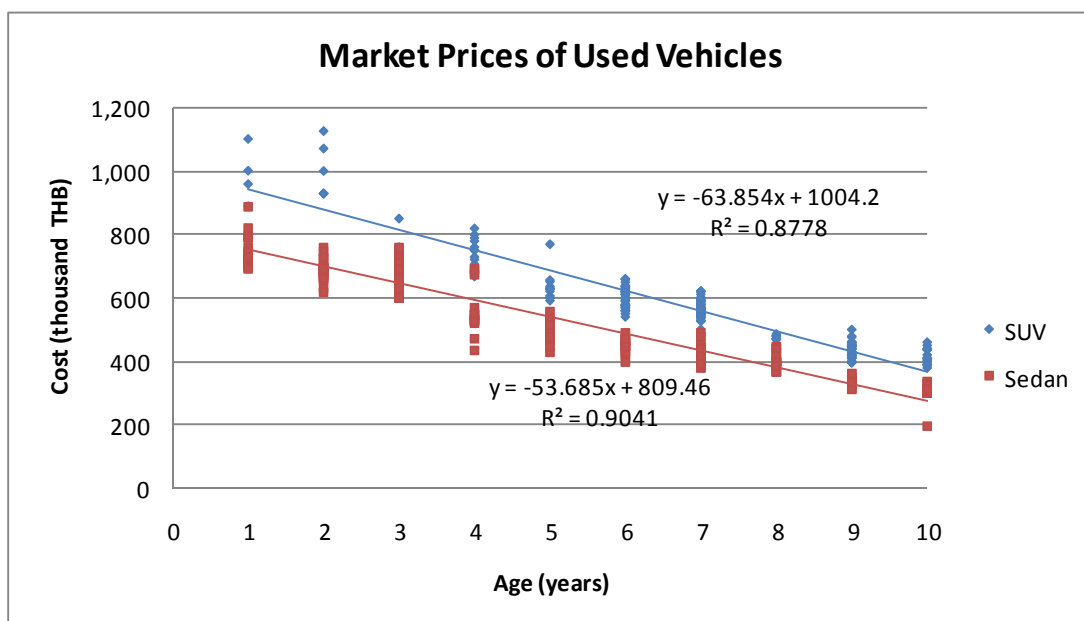
ในที่นี้ สมมติให้ราคาซื้อรถยนต์นั่งส่วนบุคคลใหม่ในปีที่ 0 เท่ากับ 789,000 บาท และราคาซื้อรถยนต์อเนกประสงค์ใหม่ เท่ากับ 1,219,000 บาท ซึ่งราคานี้เป็นราคาของรถยนต์ Honda Civic และ Honda CRV รุ่นปี 2009 ในปีพ.ศ. 2552 ในประเทศไทย สมมติให้ราคาซื้อยานพาหนะมีอัตราการเพิ่มขึ้น (หรือลดลง) เท่ากับร้อยละ 3 ต่อปี และมีต้นทุนคงที่ในการซื้อในแต่ละปีเท่ากับ 10,000 บาท ปัจจุบัน องค์กรนี้ใช้แต่ยานพาหนะที่ใช้ น้ำมันเบนซิน แต่เนื่องจากราคาน้ำมันเบนซินได้มีการปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีความผันผวนมาก องค์กรจึงได้พิจารณาการใช้พลังงานเชื้อเพลิงทางเลือก โดยได้พิจารณาการใช้ก๊าซธรรมชาติอัด (Compressed Natural Gas, CNG) และก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas, LPG) ซึ่งในปัจจุบัน ก็มีบริษัทผู้ผลิตรถยนต์หลายรายที่ได้ผลิตรถยนต์ที่สามารถใช้พลังงานทางเลือกออกมาจำหน่ายในตลาดมากขึ้น นอกจากนี้ ผู้ใช้รถยนต์ก็ยังสามารถนำรถยนต์ไปดัดแปลงให้สามารถใช้พลังงานทางเลือกได้อีกด้วย จากข้อมูล ณ สิ้นเดือนธันวาคม ปีพ.ศ. 2551 พบว่ามีรถยนต์ที่จดทะเบียนกับกรมการขนส่งทางบกที่สามารถใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิงมากถึงกว่า 500,000 คันและรถยนต์ที่สามารถใช้ CNG อีกเกือบ 100,000 คัน (สำนักจัดระบบการขนส่งทางบก, 2552) การติดตั้งระบบการใช้ LPG มีต้นทุนเท่ากับ 42,700 บาทต่อคันและการติดตั้งระบบการใช้ CNG มีต้นทุนเท่ากับ 64,900 บาทต่อคัน (ข้อมูลราคาติดตั้งระบบการใช้ก๊าซแบบฉีดในเครื่องยนต์ 4 สูบจากบริษัท พาราเมท อินเทอร์เน็ต จำกัด ในช่วงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2552) ซึ่งจากการสำรวจพบว่าต้นทุนการติดตั้งจากศูนย์ติดตั้งต่างๆ จะมีราคาใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมาก ทั้งนี้เนื่องจากมีการแข่งขันที่ค่อนข้างรุนแรง ในที่นี้ เพื่อให้ปัญหาง่ายต่อการวิเคราะห์ ผู้วิจัยจึงได้สมมติว่าราคาซื้อยานพาหนะที่สามารถใช้พลังงานทางเลือกได้ มีค่าเท่ากับราคาซื้อยานพาหนะที่ใช้ น้ำมันเบนซินอย่างเดียว บวกกับราคาค่าติดตั้งระบบการใช้พลังงานเชื้อเพลิงทางเลือก

ในปัญหาทดสอบขนาดใหญ่นี้ กำหนดให้อายุการใช้งานสูงสุดของยานพาหนะ เท่ากับ 10 ปี และได้ประมาณราคาซื้อยานพาหนะเก่าและค่าขายซากจากราคาตลาดของรถยนต์ Honda Civic และ Honda CRV ที่ประกาศขายในตลาดซื้อขายออนไลน์ของบริษัท วัน ทู คาร์ จำกัด ในช่วงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2552 ตารางที่ 4 แสดงค่าขายซากที่ประมาณได้ในรูปร้อยละของราคาเริ่มต้น ถึงแม้ว่าค่าขายซากยานพาหนะจะสามารถประมาณได้จากการวิเคราะห์การถดถอย (ดังที่แสดงในภาพที่ 4) แต่ในที่นี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้ค่าขายซากที่ต่ำที่สุดในตลาดในการทดสอบปัญหาการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะ ทั้งนี้เนื่องจากพบว่า ราคาขายซากยานพาหนะในประเทศไทยที่สำรวจได้มีราคาค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบ

กับในต่างประเทศ แม้ในกรณีที่ยานพาหนะเก่ามากแล้ว นอกจากนี้ ตลาดรถยนต์ใช้แล้วในประเทศไทยยังมิได้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับสภาพยานพาหนะที่จำหน่าย และปริมาณการใช้งานสะสมของยานพาหนะที่จำหน่ายประกอบ ดังนั้น การเลือกใช้ค่าขายซากที่ต่ำที่สุดในตลาดจะช่วยให้สามารถมั่นใจได้ว่า ค่าขายซากที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์หามีค่าไม่สูงเกินไป และไม่ส่งผลให้องค์กรตัดสินใจเปลี่ยนทดแทนยานพาหนะผิดพลาด

ตารางที่ 4 ค่าประมาณของราคาขายซากยานพาหนะในรูปร้อยละของราคาเริ่มต้น

อายุ (ปี)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
รถยนต์นั่งส่วนบุคคล	90.7	83.4	82.8	63.2	62.2	60.2	59.1	59.0	51.2	33.2
รถยนต์อเนกประสงค์	91.0	83.3	72.1	68.9	60.3	58.9	56.6	47.0	46.5	45.4



ภาพที่ 4 ราคาตลาดของยานพาหนะใช้แล้วในประเทศไทย

ตารางที่ 5 แสดงอัตราการใช้เชื้อเพลิงของยานพาหนะใหม่ โดยอัตราการใช้ LPG และ CNG ที่แสดงนี้ได้มาจากการประมวลผลจากข้อมูลที่ได้รวบรวมมาจากหลายแหล่ง ทั้งจากอินเทอร์เน็ต จากการเก็บข้อมูลด้วยตนเองของผู้ใช้รถ และจากการทดสอบขับซึ่งจริงบนท้องถนนทั้งในเมืองและนอกเมืองโดยสถาบันต่างๆ ในยานพาหนะที่มีการดัดแปลงเครื่องยนต์ให้สามารถใช้พลังงานทางเลือกได้ จะต้องมีการใช้น้ำมันเบนซินในช่วงเริ่มต้นก่อนด้วย ดังนั้น ปริมาณการใช้น้ำมันเบนซินในยานพาหนะเหล่านี้ จะขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งในการติดเครื่องยนต์มากกว่าระยะทางการขับขี่ แต่ในที่นี้ เนื่องจากปริมาณการใช้งานยานพาหนะโดยรวมไม่ต่างกันมาก ดังนั้น โดยเฉลี่ยแล้ว จำนวนครั้งในการติดเครื่องยนต์ (และปริมาณการใช้น้ำมันเบนซิน) ต่อกิโลเมตรจึงไม่น่าจะแตกต่างกันมากนัก จึงสามารถอนุมานให้ยานพาหนะที่มีการดัดแปลงเครื่องยนต์ให้ใช้พลังงานทางเลือกได้มีปริมาณการใช้น้ำมันเบนซินแปรผันตามระยะทางได้ โดยประมาณค่าเป็นปริมาณการใช้น้ำมันเบนซินต่อทุกระยะทางการใช้งาน 1 กิโลเมตร ในที่นี้ ได้สมมติให้อัตราการใช้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 ทุกระยะทางการใช้งาน 30,000 กิโลเมตร และอัตราการใช้งานของยานพาหนะทั้ง 2 แบบมีค่าใกล้เคียงกัน และเป็นไปในรูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้ (ตามอายุการใช้งานรถ) ดังนั้น อัตราการใช้เชื้อเพลิงของยานพาหนะจึงเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 ในช่วงอายุ

0-6 ปีแรก และเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 2 ในช่วงอายุที่มากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณการใช้งานลดน้อยลง นอกจากนี้ สมมติให้ ยานพาหนะมีการปรับปรุงประสิทธิภาพทุกรอบ 4 ปี ทำให้สามารถใช้เชื้อเพลิงได้มีประสิทธิภาพขึ้นร้อยละ 7 โดยการ ปรับปรุงครั้งล่าสุดเกิดขึ้นในปีที่ 0 ของระยะเวลาวางแผน

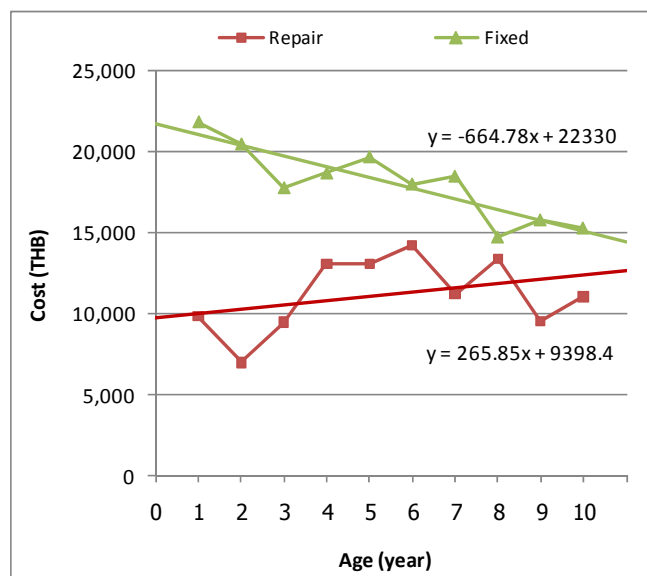
ตารางที่ 5 ค่าประมาณของอัตราการใช้เชื้อเพลิงของยานพาหนะใหม่

ยานพาหนะ	อัตราการใช้เชื้อเพลิงของยานพาหนะใหม่					
	น้ำมันเบนซิน	LPG	CNG	น้ำมันเบนซิน	LPG	CNG
	(ก.ม./ล.)	(ก.ม./ล.)	(ก.ม./ก.ก.)	(ล./ก.ม.)	(ล./ก.ม.)	(ก.ก./ก.ม.)
รถยนต์ส่วนบุคคล						
ที่ใช้ น้ำมันเบนซิน	15.31			0.0653		
ที่ใช้ LPG	130.00	13.23		0.0077	0.0756	
ที่ใช้ CNG	104.19		10.39	0.0096		0.0962
รถยนต์อเนกประสงค์						
ที่ใช้ น้ำมันเบนซิน	11.48			0.0871		
ที่ใช้ LPG	66.34	9.92		0.0151	0.1008	
ที่ใช้ CNG	78.15		7.79	0.0128		0.1284

ราคาเชื้อเพลิงในปีที่ 0 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 25.74 บาทต่อลิตร สำหรับน้ำมันเบนซิน เท่ากับ 11.29 บาทต่อลิตร สำหรับ LPG และเท่ากับ 8.50 บาทต่อกิโลกรัมสำหรับ CNG ในที่นี้ เพื่อให้ปัญหาง่ายต่อการวิเคราะห์ จึงสมมติให้ราคาน้ำมัน เบนซินและ LPG มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 ทุกปี ซึ่งอัตรานี้ได้มาจากการประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงของราคาเชื้อเพลิงโดย คร่าวๆ โดยไม่ได้นำช่วงที่ราคาน้ำมันมีความผันผวนผิดปกติในช่วงปีพ.ศ. 2551 มาพิจารณา สำหรับราคา CNG พบว่า รัฐบาลได้ตรึงราคา CNG ไว้ที่ 8.50 บาทต่อกิโลกรัมมาตั้งแต่เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2548 เนื่องจากต้องการส่งเสริมการใช้ CNG ให้เป็นพลังงานทางเลือกหลักที่ใช้ในประเทศไทย และเพื่อบรรเทาความเดือดร้อนของผู้ประกอบการภาคขนส่งจาก สภาวะเศรษฐกิจถดถอย รวมทั้งจากปัจจัยทางการเมือง แต่อย่างไรก็ตาม รัฐบาลมีแผนที่จะค่อยๆ ปรับราคา CNG ขึ้นใน อนาคต โดยมีนโยบายที่จะรักษาระดับราคา CNG ให้ไม่เกินร้อยละ 50 ของราคาขายปลีกน้ำมันดีเซลในตลาด ดังนั้น ใน การศึกษาครั้งนี้ จึงสมมติให้ราคา CNG มีการปรับตัวสูงขึ้น 0.50 บาทต่อปี ซึ่งเป็นอัตราการเพิ่มของราคา CNG ที่ประมาณได้ จากราคาขายปลีกจริงในช่วงก่อนที่จะมีการตรึงราคาในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2548

สำหรับค่าซ่อมบำรุง ค่าอะไหล่ และค่าบริการตามระยะทาง ของยานพาหนะ ได้มาจากข้อมูลค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง ค่าอะไหล่ และค่าบริการตามระยะทางของรถยนต์ Honda Civic รุ่นปี 2009 และ Honda CRV รุ่นปี 2007 ที่บริษัท ฮอนด้า ออโตโมบิล (ประเทศไทย) จำกัดได้แสดงไว้ในเว็บไซต์ โดยข้อมูลดังกล่าวเป็นราคาสำรวจ ณ วันที่ 23 เมษายน พ.ศ. 2552 สำหรับค่ายางรถยนต์ กำหนดให้มีการเปลี่ยนทุกระยะทางการใช้งาน 50,000 กิโลเมตร ค่าซ่อมยานพาหนะและต้นทุน คงที่ (รวมค่าประกันยานพาหนะ ค่าธรรมเนียม ค่าทะเบียนยานพาหนะ และอื่นๆ) ได้ประมาณขึ้นโดยใช้ข้อมูลจากบริษัท แห่งหนึ่ง (ดังในภาพที่ 5) ต้นทุนคงที่มีค่าประมาณ 22,500 บาทที่ช่วงเวลาที่ 0 และลดลงประมาณ 665 บาทต่อปี ขณะที่ ค่าซ่อมยานพาหนะมีค่าประมาณ 10,000 บาทที่ช่วงเวลาที่ 0 และเพิ่มขึ้นประมาณ 265 บาทต่อปี ค่าซ่อมบำรุงและค่า อะไหล่ของยานพาหนะที่ดัดแปลงการใช้เชื้อเพลิงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณ 0.02 บาทต่อกิโลเมตร (ข้อมูลจาก

ผู้เชี่ยวชาญด้านเครื่องยนต์) ในที่นี้ ได้สมมติให้ค่าซ่อมยานพาหนะ ต้นทุนคงที่ และค่าซ่อมบำรุงและค่าอะไหล่ของยานพาหนะที่ดัดแปลงการใช้เชื้อเพลิงของรถยนต์อเนกประสงค์มีค่าสูงกว่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลประมาณร้อยละ 10 ต้นทุนค่าใช้จ่ายต่างๆ และต้นทุน O&M รวมแสดงได้ดังในตารางที่ 6 และภาพที่ 6 โดยในตารางที่ 6 ได้แสดงอัตราการใช้งานยานพาหนะไว้ด้วย ในงานวิจัยนี้ คิดค่าเสื่อมราคาของยานพาหนะภายใน 5 ปี โดยใช้วิธีการคำนวณแบบเส้นตรง (Straight-line depreciation method) สมมติให้อัตราภาษีมีค่าเท่ากับร้อยละ 30 และใช้อัตราคิดลด (Discount factor) เท่ากับร้อยละ 10



ภาพที่ 5 ประมาณการของค่าซ่อมยานพาหนะและต้นทุนคงที่

ตารางที่ 6 อัตราการใช้งานยานพาหนะและต้นทุน O&M รวมของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล

อายุ (ปี)	อัตราการใช้งาน (ก.ม.)		รายการต้นทุน O&M (บาท)				ต้นทุนรวม (บาท)
	รายปี	สะสม	ค่าอะไหล่และค่าบริการ	ค่ายางรถยนต์	ค่าซ่อมยานพาหนะ	ต้นทุนคงที่	
0	31,500	31,500	4,093	0	10,000	22,500	36,593
1	35,000	66,500	8,049	12,360	10,265	21,835	52,509
2	35,000	101,500	12,440	12,360	10,530	21,170	56,500
3	35,000	136,500	5,794	0	10,795	20,505	37,094
4	29,750	166,250	8,586	12,360	11,060	19,840	51,846
5	28,000	194,250	6,492	0	11,325	19,175	36,992
6	26,250	220,500	11,374	12,360	11,590	18,510	53,834
7	17,500	238,000	1,252	0	11,855	17,845	30,952
8	14,000	252,000	5,357	12,360	12,120	17,180	47,017
9	10,500	262,500	3,588	0	12,385	16,515	32,488



ภาพที่ 6 ต้นทุน O&M รวมของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล

เนื่องจากข้อมูลทั้งหมดในปัญหาทดสอบขนาดใหญ่นี้รวบรวมมาจากข้อมูลจริงหรือประมาณการมาจากข้อมูลจริง (เช่น ราคาซื้อยานพาหนะ ค่าขายซาก ค่าติดตั้งระบบการใช้พลังงานทางเลือก ต้นทุน O&M และอัตราการใช้งานยานพาหนะตามอายุยานพาหนะ) หรือมีการสมมติค่าให้สอดคล้องกับความเป็นจริง (เช่น จำนวนยานพาหนะในกองยานพาหนะเริ่มต้น อัตราคิดลด อัตราภาษี การคิดค่าเสื่อมของยานพาหนะ อัตราการใช้เชื้อเพลิงของยานพาหนะ และอัตราการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิง) ดังนั้น ปัญหาทดสอบขนาดใหญ่นี้จึงถือได้ว่าเป็นความใกล้เคียงกับปัญหาจริงมาก ผลการทดสอบกับปัญหาขนาดใหญ่สามารถสรุปได้ดังในตารางที่ 7 โดยที่แต่ละแถวแสดงถึงสถานการณ์ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยกรณีฐาน ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่มีกัณฑ์บังคับใช้นโยบายการเปลี่ยนทดแทนใดๆ กรณีบังคับใช้นโยบาย PNOR กรณีบังคับใช้นโยบาย OPCR กรณีบังคับใช้นโยบาย OVSR กรณีบังคับใช้นโยบาย NSSR กรณีบังคับใช้นโยบาย AONR กรณีบังคับใช้นโยบาย PNOR, OPCR, OVSR และ NSSR พร้อมกัน และกรณีบังคับใช้นโยบาย OPCR, OVSR และ NSSR พร้อมกัน ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ (Tolerance) ที่แสดงในตารางที่ 7 แสดงถึงความแตกต่างระหว่างต้นทุนรวม (Objective function value) ของคำตอบที่ได้และของคำตอบผ่อนผันที่ดีที่สุดจาก CPLEX solver ต้นทุนรวมของกรณีฐานจะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้ และเป็นค่าที่ใช้เปรียบเทียบความแตกต่างกับต้นทุนรวมจากกรณีอื่นๆ ในสมมติของนโยบายการเปลี่ยนทดแทน (Replacement policies) แสดงถึงการสอดคล้องของคำตอบกับนโยบายการเปลี่ยนทดแทนนั้นๆ เช่น ในกรณีฐาน ซึ่งไม่มีกัณฑ์บังคับใช้นโยบายการเปลี่ยนทดแทนใดๆ พบว่าคำตอบที่ได้ให้ผลสอดคล้องกับนโยบายการเปลี่ยนทดแทน OVSR, NSSR และ AONR เช่นเดียวกับเมื่อบังคับใช้นโยบาย OVSR เพียงนโยบายเดียว, เมื่อบังคับใช้นโยบาย NSSR เพียงนโยบายเดียว และเมื่อบังคับใช้นโยบาย AONR เพียงนโยบายเดียว ในสมมติการใช้เชื้อเพลิง (Fuel usage) แสดงถึงจำนวนปี (จากระยะเวลาวางแผนทั้งหมด 20 ปี) ที่มีการใช้ยานพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิงดังกล่าวอยู่ในกองยานพาหนะ เช่น ในกรณีฐาน มีการใช้ยานพาหนะที่ใช้ LPG เพียงชนิดเดียวอยู่ตลอด 20 ปี (ตลอดระยะเวลาวางแผน)

ตารางที่ 7 ผลการคำนวณแก้ปัญหาทดสอบขนาดใหญ่

				Replacement policies				Fuel usage (number of periods)						
Scenario	Tolerance	Obj. fcn. val	% off. opt	OPCR	OVSR	NSSR	AONR	Gasoline (G)	LPG	CNG	G + LPG	G + CNG	LPG + CNG	All three
Base case	0.000057	456,693,312			x	x	x		20					
PNOR	0.000315	1,170,681,482	156.3%						19		1			
OPCR	0.000001	456,891,299	0.043%	x					20					
OVSR	0.000010	456,712,665	0.004%		x	x	x		4				16	
NSSR	0.000100	456,693,312	Optimal		x	x	x		20					
AONR	0.000010	456,693,312	Optimal		x	x	x		20					
PNOR+OPCR+OVSR+NSSR	0.000724	1,173,725,399	157.0%	x	x	x		2	18					
OPCR+OVSR+NSSR	0.000098	457,110.948	0.091%	x	x	x	x		20					

ผลจากการทดสอบแก้ปัญหาขนาดใหญ่เพื่อศึกษาผลของการใช้นโยบายการเปลี่ยนทดแทนต่างๆ สอดคล้องกับกรณีการทดสอบแก้ปัญหาขนาดเล็ก กล่าวคือ นโยบาย PNOR ที่นิยมใช้กันมากนั้นเป็นนโยบายที่ไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ ส่วนนโยบายอื่นๆ ได้แก่ OPCR, OVSR, NSSR และ AONR เป็นนโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสม มีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยที่นโยบาย OVSR, NSSR และ AONR เป็นนโยบายที่มักจะให้ผลพร้อมกันในกำหนดการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสม (ดูได้จากผลในแถวที่ 4-6 ของตารางที่ 7) กล่าวคือ หากมีการบังคับใช้นโยบายใดนโยบายหนึ่งแล้ว นโยบายการเปลี่ยนทดแทนอีก 2 นโยบายจะเป็นจริงไปด้วย นอกจากนี้ พบว่าเมื่อบังคับใช้นโยบาย OPCR, OVSR และ NSSR พร้อมกัน (ผลในแถวที่ 7 ของตารางที่ 7) ความแตกต่างของต้นทุนรวมเปรียบเทียบกับในกรณีฐานจะมีค่าเพียงร้อยละ 0.091 เท่านั้น แสดงว่านโยบายทั้งสามที่เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปนี้ เมื่อนำมาใช้ร่วมกันก็ยังไม่ให้ผลที่ดี

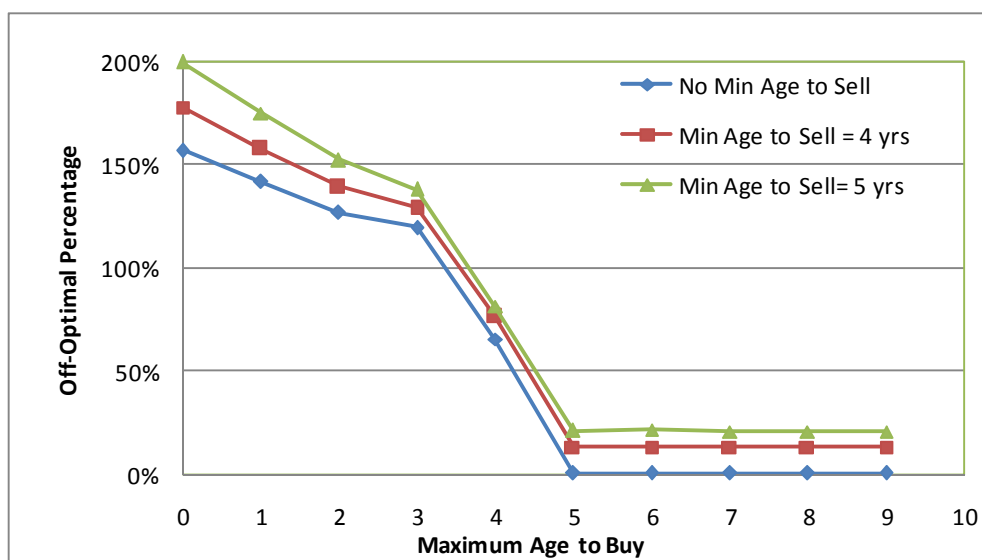
สำหรับการใช้พลังงานเชื้อเพลิงทางเลือก พบว่า ตลอดระยะเวลาวางแผน 20 ปี การใช้ LPG จะเป็นเชื้อเพลิงที่คุ้มค่ามากที่สุดสำหรับทุกกรณี พบว่ามีการเลือกใช้น้ำมันเบนซินอย่างเดียวยู่เพียง 1 ช่วงเวลา เมื่อบังคับใช้นโยบาย PNOR โดยเป็นการใช้งานร่วมกับยานพาหนะที่ใช้ LPG และมีการเลือกใช้น้ำมันเบนซินอย่างเดียวยู่ 2 ช่วงเวลาเมื่อบังคับใช้นโยบายการเปลี่ยนทดแทน 4 นโยบายพร้อมกัน ในกรณีที่บังคับใช้นโยบาย OVSR พบว่าจะมีช่วงเวลาที่ใช้น้ำมันเบนซินที่ใช้ LPG และ CNG เป็นเชื้อเพลิงอยู่ในกองยานพาหนะร่วมกันถึง 16 ช่วงเวลา ส่วนอีก 4 ช่วงเวลาจะเลือกใช้น้ำมันเบนซินที่ใช้ LPG เท่านั้น ผลในตารางที่ 7 นี้แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ราคาเชื้อเพลิง LPG จะสูงกว่า แต่ด้วยค่าติดตั้งที่ต่ำกว่า ทำให้การใช้น้ำมันเบนซินที่ใช้เชื้อเพลิง LPG มีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์มากกว่ายานพาหนะแบบอื่น

นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์กำหนดการเปลี่ยนทดแทนที่เหมาะสมที่สุดในกรณีฐานยังอาจสรุปได้ว่า อายุการใช้งานยานพาหนะที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนทดแทนมากที่สุดคือ 5 ปี เนื่องจากพบว่าส่วนใหญ่แล้ว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเลือกเปลี่ยนทดแทนยานพาหนะที่อายุการใช้งานดังกล่าวบ่อยที่สุด ทำให้ยานพาหนะที่ใหม่กว่าที่มีอยู่ในช่วงเวลาแรกถูกขายทิ้งทันที ซึ่งการตัดสินใจนี้อาจขัดต่อความรู้สึกของผู้ประกอบการ ซึ่งมักคิดว่ายานพาหนะอายุ 5 ปีมีประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงต่ำ หรืออาจไม่สามารถนำไปใช้งานได้เต็มที่ เนื่องจากอาจมีปัญหาด้านเครื่องยนต์บ่อย และผู้ใช้น้ำมันพาหนะอาจไม่ต้องการใช้น้ำมันพาหนะเก่า ดังนั้น เพื่อให้การวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะเสมือนจริงมากขึ้น ผู้วิจัยจึง

ได้ทดสอบบังคับใช้นโยบาย OPCR, OVSR และ NSSR พร้อมกัน (ซึ่งตามที่ได้แสดงผลในแถวที่ 7 ของตารางที่ 7 พบว่ามีความแตกต่างของต้นทุนรวมเปรียบเทียบกับในกรณีฐานเพียงร้อยละ 0.091) โดยได้เพิ่มข้อจำกัดของอายุยานพาหนะสูงสุดที่สามารถซื้อได้ (A maximum-age-to-buy หรือ MaxAge) และข้อจำกัดของอายุยานพาหนะต่ำสุดที่สามารถขายได้ (A minimum-age-to-sell หรือ MinAge) เพื่อกำหนดขอบเขตของอายุยานพาหนะที่จะซื้อและขายได้ในแต่ละช่วงเวลา ในการทดสอบ ได้ลองปรับอายุยานพาหนะสูงสุดที่สามารถซื้อได้ตั้งแต่ 0 ปี – 9 ปี ซึ่งการกำหนดให้ MaxAge เท่ากับ 0 ปีจะเทียบเท่ากับการใช้นโยบาย PNOR นั้นเอง นอกจากนี้ ได้ปรับอายุยานพาหนะต่ำสุดที่สามารถขายได้เป็น 3 กรณี คือกรณีที่ ไม่กำหนดอายุยานพาหนะต่ำสุดที่สามารถขายได้ กรณีที่กำหนด MinAge เท่ากับ 4 ปี และกรณีที่กำหนด MinAge เท่ากับ 5 ปี ผลการทดสอบแสดงได้ดังในตารางที่ 8 และภาพที่ 7

ตารางที่ 8 ผลของการกำหนดอายุยานพาหนะสูงสุดที่สามารถซื้อได้และอายุยานพาหนะต่ำสุดที่สามารถขายได้

Maximum Age to Buy	No Minimum Age to Sell		Minimum Age to Sell = 4 yrs		Minimum Age to Sell = 5 yrs	
	Obj.fcn.val	% off.opt	Obj.fcn.val	% off.opt	Obj.fcn.val	% off.opt
0	1,173,725,399	157.01%	1,268,194,069	177.69%	1,368,282,931	199.61%
1	1,102,865,268	141.49%	1,176,146,353	157.54%	1,255,984,533	175.02%
2	1,035,258,551	126.69%	1,092,615,422	139.24%	1,152,393,141	152.33%
3	1,002,169,179	119.44%	1,045,260,468	128.88%	1,085,512,691	137.69%
4	755,274,482	65.38%	806,111,594	76.51%	828,758,664	81.47%
5	457,110,948	0.091%	516,470,228	13.09%	552,069,609	20.88%
6	457,110,948	0.091%	516,470,228	13.09%	554,962,697	21.52%
7	457,110,948	0.091%	516,470,228	13.09%	550,555,504	20.55%
8	457,110,948	0.091%	516,470,228	13.09%	550,555,504	20.55%
9	457,110,948	0.091%	516,470,228	13.09%	550,555,504	20.55%



ภาพที่ 7 ร้อยละของความแตกต่างของต้นทุนรวมเปรียบเทียบกับในกรณีฐาน เมื่อกำหนดอายุยานพาหนะสูงสุดที่สามารถซื้อได้และอายุยานพาหนะต่ำสุดที่สามารถขายได้

จากผลที่แสดง จะเห็นได้ว่า เมื่อไม่มีการกำหนด MinAge ต้นทุนรวมจะมีค่าลดลงเป็นเชิงเส้นเมื่อ MaxAge ที่กำหนดเพิ่มจาก 0 ปีเป็น 3 ปี และจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อการกำหนดค่า MaxAge เพิ่มเป็น 4-5 ปี เมื่อ MaxAge เพิ่มถึง 5 ปีแล้ว คำตอบที่ได้จะเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุด นั่นคือ การเพิ่มอายุยานพาหนะสูงสุดที่สามารถซื้อได้ให้มากกว่า 5 ปีไม่มีผลต่อต้นทุนรวม เนื่องจากแบบจำลองคณิตศาสตร์จะไม่เลือกซื้อยานพาหนะที่มีอายุมากกว่า 5 ปีมาใช้งานอยู่แล้ว ในกรณีที่กำหนด MinAge เท่ากับ 4 ปีและ 5 ปี ก็จะมีแนวโน้มในรูปแบบเดียวกัน เพียงแต่การกำหนดอายุยานพาหนะต่ำสุดที่สามารถขายได้ไว้ที่ 4 ปีและ 5 ปี จะทำให้ต้นทุนรวมที่ได้มีค่าสูงกว่าต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุด (Off-optimal) ผลที่แสดงนี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจของผู้ประกอบการ เพื่อดูว่าการตัดสินใจตามความเชื่อส่วนบุคคลนั้นจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการเปลี่ยนทดแทนกองยานพาหนะอย่างไร นอกจากนี้ ผลที่แสดงนี้อาจชี้ให้ผู้ประกอบการเห็นว่ายานพาหนะอายุ 4-5 ปีไม่ได้มีประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงต่ำหรือมีปัญหาด้านเครื่องยนต์บ่อยอย่างที่คาดคิด

สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาผลของการใช้นโยบายการเปลี่ยนทดแทนที่มักนิยมใช้กันในทางปฏิบัติ และที่ได้มีการนำเสนอไว้ในเอกสารวิชาการ ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนทดแทนแบบขนานสำหรับกองยานพาหนะและอุปกรณ์เครื่องมือภายใต้รูปแบบการใช้งานตามความพึงพอใจของผู้ใช้ ผลการวิเคราะห์แก้ปัญหาทดสอบภายใต้สถานการณ์ต่างๆ แสดงให้เห็นว่า นโยบายการซื้อเฉพาะยานพาหนะใหม่มาเปลี่ยนทดแทนเท่านั้น (Purchase-new-vehicles-only rule, PNOR) เป็นนโยบายที่ไม่เหมาะสม และการซื้อยานพาหนะเก่าที่ยังมีอายุการใช้งานน้อยจะมีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์มาก เนื่องจากยานพาหนะดังกล่าวมีราคาซื้อต่ำกว่ายานพาหนะใหม่มาก แต่ต้นทุนการใช้งานและการซ่อมบำรุงต่อหน่วยไม่สูงกว่าต้นทุนของยานพาหนะใหม่มากนัก ส่วนนโยบายการเปลี่ยนทดแทนอื่นๆ ที่มักนิยมใช้กัน ได้แก่ การจำหน่ายยานพาหนะที่เหมือนกันพร้อมกันทั้งหมด (No-splitting-in-selling rule) การซื้อยานพาหนะเพียงรูปแบบเดียวมาใช้งาน (One-purchase-choice rule) และการจำหน่ายยานพาหนะที่เก่ากว่าก่อน (Older-vehicles-selling rule) รวมทั้งนโยบายที่อาจไม่เป็นที่นิยมนักอย่างนโยบายการตัดสินใจเปลี่ยนทดแทนยานพาหนะทั้งหมดหรือไม่เปลี่ยนทดแทนเลย (All-or-none rule) โดยที่มิได้คำนึงถึงอายุการใช้งานของยานพาหนะ เป็นนโยบายที่มีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยให้ต้นทุนการเปลี่ยนทดแทนรวมสูงกว่าต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุด (Optimal total costs) เพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ พบว่าการใช้เชื้อเพลิงก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas, LPG) จะคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์มากกว่าการใช้ก๊าซธรรมชาติอัด (Compressed Natural Gas, CNG) เนื่องจากมีต้นทุนการติดตั้งที่ต่ำกว่า

เอกสารอ้างอิง

- สำนักจัดระบบการขนส่งทางบก กรมการขนส่งทางบก กระทรวงคมนาคม, (2552), จำนวนรถจำแนกตามชนิดเชื้อเพลิง, http://www.dlt.go.th/statistics_web/fuel.html, (20 กรกฎาคม 2552)
- บริษัท พาราเม้าท์ อินเตอร์เอร์ท จำกัด, (2552), <http://www.paramountngv.com>, (20 กรกฎาคม 2552)
- บริษัท วัน ทู คาร์ จำกัด, (2552), <http://www.one2car.com>, (20 กรกฎาคม 2552)
- บริษัท ฮอนด้า ออโตโมบิล (ประเทศไทย) จำกัด, (2552), <http://www.honda.co.th>, (20 กรกฎาคม 2552)
- Ban, J. and Hartman, J. C., (2002), "The Series-Parallel Replacement Problem," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 18, 215-221.
- Bean, J. C., Lohmann, J. R., and Smith, R. L., (1994), "Equipment Replacement under Technological Change," *Naval Research Logistics*, 41, 117-128.
- Chang, P. T., (2005), "Fuzzy Strategic Replacement Analysis," *European Journal of Operational Research*, 160, 532-559.
- Chen, Z., (1998), "Solution Algorithms for the Parallel Replacement Problem under Economy of Scale," *Naval Research Logistics*, 45, 279-295.
- Fraser, J. M., and Posey J. W., (1989), "A Framework for Replacement Decisions," *European Journal of Operational Research*, 40, 43-57.
- Hartman, J. C., (1999), "A General Procedure for Incorporating Asset Utilization Decisions into Replacement Analysis," *The Engineering Economist*, 44 (3), 217-238.
- Hartman, J. C., (2000), "The Parallel Replacement Problem with Demand and Capital Budgeting Constraints," *Naval Research Logistics*, 47, 40-56.
- Hartman, J. C., (2001), "An Economic Replacement Model with Probabilistic Asset Utilization," *IIE Transactions*, 33, 717-727.
- Hartman, J. C., (2004), "Multiple Asset Replacement Analysis under Variable Utilization and Stochastic Demand," *European Journal of Operational Research*, 159 (1), 145-165.
- Hartman, J. C., (2006), "Finite-horizon Equipment Replacement Analysis," *IIE Transactions*, 38, 409- 419.
- Hopp, W. J., Jones, P. C., and Zydiak, J. L., (1993), "A Further Note on Parallel Machine Replacement," *Naval Research Logistics*, 40, 575-579.
- Hopp, W. J., and Nair, S. K., (1991), "Timing Replacement Decisions under Discontinuous Technological Change," *Naval Research Logistics*, 38, 203-220.
- Jones, P. C., Zydiak, J. L., and Hopp, W. J., (1991), "Parallel Machine Replacement," *Naval Research Logistics*, 38, 351-365.
- Karabakal, N., Lohmann, J. R., and Bean, J. C. (1994), "Parallel Replacement under Capital Rationing Constraints," *Management Science*, 40, 305-319.
- Tang, J., and Tang, K., (1993), "A Note on Parallel Machine Replacement," *Naval Research Logistics*, 40, 551-555.

ภาคผนวก

A NEW MATHEMATICAL MODEL FOR PARALLEL REPLACEMENT PROBLEM WITH ALTERNATIVE FUELS AND USER-DEMAND PATTERN

Parthana Parthanadee

Department of Agro-Industry Technology Management
Kasetsart University
Thailand
parthana.p@ku.ac.th

Jirachai Buddhakulsomsiri

School of Manufacturing Systems and Mechanical Engineering
Sirindhorn International Institute of Technology
Thammasat University
Thailand
jirachai@siit.tu.ac.th

ABSTRACT

Parallel replacement problem deals with determining an optimal vehicle replacement schedule within a planning horizon that results in a minimal total cost of owning and operating a fleet of assets, such as vehicles, equipments, or machines. In this paper, the problem under study consists of a fleet of service vehicles commonly owned by government agencies and private business organizations. The vehicles vary in their categories or functions, ages, and cumulative mileages. The paper focuses on new aspects of the problems, including considerations of alternative fuel types and a new pattern of user demands. Alternative fuels considered are natural gas and liquefied petroleum gas, while the new pattern of utilization is called dependent usage pattern where periodic or yearly usages of vehicles depend on their ages and cumulative mileages. Mathematical formulation of the defined problem that incorporates these new factors is provided. A numerical example is provided to demonstrate the problem and some preliminary computational results. Insights learned about the problem are also discussed.

KEYWORDS

Parallel replacement, mathematical model, utilization patterns, alternative fuels

1. INTRODUCTION

Replacement problems involve determining an optimal replacement schedule that results in a minimum total cost of owning and operating an asset or a fleet of assets over a finite or infinite planning horizon. In general, assets may be machines, equipment, and/or vehicles, whose performance or

efficiencies deteriorate over their useful lives. When assets get older, they incur higher costs to operate or be utilized. These costs include operating cost (e.g. utility, fuel), maintenance cost (e.g. part replacement, scheduled or preventive maintenance), repair cost (e.g. machine or its component breakdown), fixed cost (e.g. taxes, insurance fees), and other overhead costs. Such higher costs combining with less efficiencies call for the asset replacement.

In the literature, there are a large number of research studies related to the replacement problems. The serial replacement problem of a single asset is well studied; see, for example, Fraser and Posey (1989), Hopp and Nair (1991), Bean et al. (1994). In multiple-asset case, replacement decisions must be considered in parallel because assets are interdependent for one or more of these reasons: (1) they exist to satisfy a prespecified level of demand (Hartman, 1999), (2) their replacement compete for a common pool of limited budget (Karabakal et al., 1994), (3) economy of scale associated with asset investment costs (Jones et al., 1991; Hopp et al., 1993; Tang and Tang, 1993; Chen, 1998). In other words, parallel replacement problem involves trade-offs between the capital expenses of acquiring new assets, capital gains from salvage values of old assets, and the operational costs of new versus old assets. Recent studies on parallel replacement problem with various problem characteristics and settings can be found in Rajagopalan (1998), Hartmann (2000, 2001, 2004), among others.

From the real application standpoint, parallel replacement problems occur widely in many situations. Examples are government agencies or private business organizations that maintain fleets of vehicles and equipment to satisfy public service

demands (e.g., transportation or performing specific tasks). Vehicles in such fleet can be organized into classes, where a class may be categorized by size and/or function. Within a class, vehicles are usually varied in their ages and cumulative mileages. This variety directly effects on preferences shown by the users in that they more often select newer vehicles. In other words, usage pattern in some actual situations can be stated as follow: given various vehicles available to provide the same service or function, it is the newer ones that are generally preferred. When replacements decisions are made, the effect of this usage pattern should be considered. That is because as older vehicles are replaced by new vehicles, the new vehicles become the most highly utilized, which in turn affects their cumulative mileages and operational costs. Dependent usage of vehicles is strongly inconsistent with an often made assumption in many studies in the literature that the operating and maintenance (O&M) costs is a non-decreasing function of age. That is because the more the new vehicles are utilized, the more O&M costs they incur.

This paper aims at bridging the gap between the parallel replacement model in the literature and the real problems that exist in industry. The focus of the paper is particularly on the replacement of a fleet of service vehicles. Although targeted at vehicle fleet, the model is applicable to other applications with similar characteristics. Some real-world aspects of the problem will be considered, including realistic user demand pattern commonly found in service vehicle fleet, the current situation of high gasoline price and the availability of other cheaper and more efficient fuel alternatives, and some replacement and purchasing policies often made in replacement decisions. More specifically, the objectives of this paper are to clearly define the problem characteristics and formulate it into a mathematical model that captures these aspects.

The remainder of the paper is organized as follows. Section 2 explains in detail the characteristics of the problem and the motivation behind them. Section 3 presents the formulated mathematical model of the problem. Then, in Section 4 a numerical example is presented to demonstrate the problem. The problem instance is solved to optimality to gain some insights about the optimal replacement solution. Finally, conclusion and future direction are given in Section 5.

2. PROBLEM CHARACTERISTICS

2.1. Utilization patterns and cost assumptions

In the literature on parallel replacement problem, one of the commonly made assumptions is that the operating and maintenance (O&M) cost is a non-decreasing function of asset age (and/or cumulative utilization). That is because assets would require more repairs and maintenance as they get older. This assumption is valid for most real world applications when asset age has no effect on the user's preference (e.g. machine, equipment, and engine) so that the utilization rate is approximately constant for all assets. However, in the case where assets are service vehicles, the constant utilization assumption may not hold true. This is because newer and less utilized vehicles are selected for use with higher user's preference. With this utilization pattern, the O&M costs may no longer be a non-decreasing function of age and cumulative mileage. Thus, an important aspect of the problem is to study the problem that has utilization and cost parameters governed by dependent usage pattern.

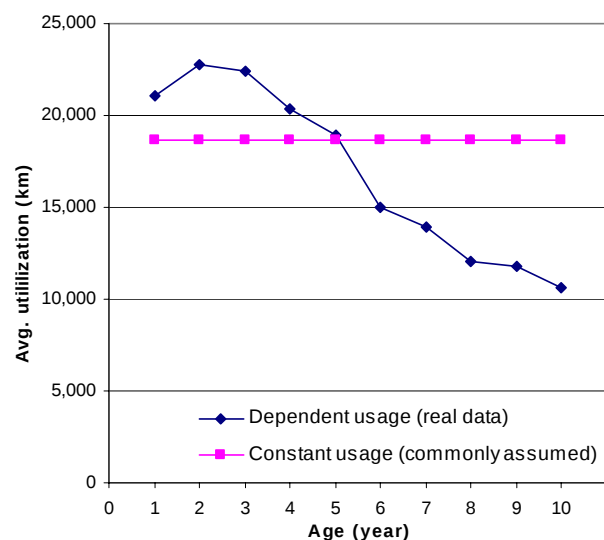


Figure 1 Comparison of usage pattern in actual situations and commonly assumed in the literature

The motivation for studying this utilization pattern is from real fleet data obtained from an organization. The data set contains 8 years of utilization and O&M costs data from a class of vehicles (177 passenger cars). A relationship between the average utilization per vehicle and their ages from this data set is given in Figure 1. Note that the average utilization of vehicles at 1-year-old is less than that of the 2-years-

old because not all brand new vehicles were purchased at the beginning of the year. The decreasing trend of the average utilization with increasing age, called “dependent usage”, is evidential for this real data.

Moreover, the corresponding O&M costs of these vehicles consist of operating cost (fuels), fixed cost (insurance and other fees), and repair cost (part and labor costs for maintenance and repairs). The trends of these costs, as well as the total O&M cost, are shown in Figure 2.

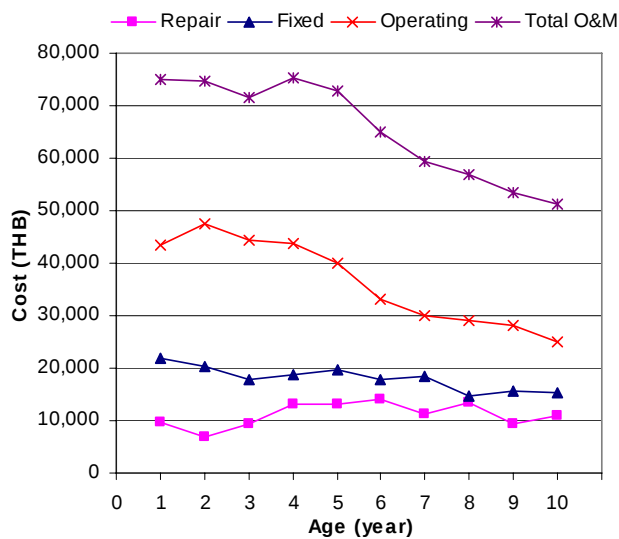


Figure 2 Actual trends in average O&M costs vs. vehicle age

It can be seen that,

- The operating costs tend to decrease with age, as older vehicles have lower utilization, therefore, less fuel costs.
- The fixed costs also seem to decrease with age because insurance and other fees are subject to the vehicles’ values that depreciate over time
- The repair and maintenance costs appear to increase with age since older vehicles need more repairs and maintenance
- The total O&M costs follow a non-linear pattern during early ages, then tend to decrease later with age. This trend evidently shows that dependent usage pattern that usually occurs in real data is not consistent with the non-decreasing O&M cost assumption often made.

2.2. Alternative fuels

The continuous rise of gasoline price over the past few years and the availability of other cheaper fuels motivate the decision makers to contemplate using alternative fuels for service vehicles. Vehicles that can run on new, lower cost, and high efficient fuels, such as natural gas (NGV) and liquefied petroleum gas (LPG) are being seriously considered as new challengers for replacement to gasoline vehicles in Thailand. Thus, a new aspect of the parallel replacement problem under study is to include the use of alternative fuels. Projected fuel prices, useful life, and O&M costs of the new challengers are parameterized into the model to investigate the impact of alternative fuels on optimal replacement schedule. In addition, modifying gasoline engines in existing fleet vehicles that would enable them to use these alternative fuels will be modeled as another decision options in the replacement plan.

2.3. Decision policies

Two common decision policies are considered: replacement policy and purchasing policy. For replacement policy, intuitively the decision maker would replace older vehicles before newer ones. This policy is known as older cluster replacement rule (OCRR). Hopp *et al.* (1993) proved that the OCRR is an optimal replacement policy under assumptions that the O&M costs are non-decreasing functions of age (implied constant utilization pattern), salvage values are non-increasing functions of age, and together they are non-decreasing (effect of non-decreasing in O&M is stronger than effect of non-increasing in salvage value). However, this rule may or may not be an optimal replacement policy for a fleet of service vehicle under dependent usage. Thus, the problem with dependent usage pattern will be solved with and without this rule to investigate their effects on the optimal solutions.

For purchasing policy, many organizations use a policy that purchases only brand new vehicles, although allowing used vehicle (1-3 years old) purchases may be economically better. One aspect of the problem is, therefore, to examine the effect of this policy on the optimal replacement decisions and their associated total costs by solving the problem with and without enforcing new-vehicle-only purchasing policy.

3. MATHEMATICAL MODEL

The mathematical formulation for the replacement problem defined in the previous section is presented in this section. The model is a modification from the model proposed in Hartman (1999). The main difference is that, in this model the utilization per period for vehicles of the same age is subjected to known users' demand (dependent usage pattern, in this case), and thus, is a model parameter; whereas in Hartman (1999)'s model, utilization is defined as a decision variable (i.e. assuming the decision maker has controls over operational decisions). The model is an integer linear program based on the following notations.

Index sets:

- i vehicle age, $i = \{0, 1, 2, \dots, N\}$, where N is the maximum useful life of a vehicle
- j period in the finite planning horizon, $j = \{0, 1, 2, \dots, T\}$
- o fuel option, o being 1 denotes the gasoline fuel option; and o being $2, \dots, O$ denote alternative fuel options

Model parameters:

- f discount factor per period
- p_{ijo} unit purchase cost of a vehicle using fuel option o at age i in period j
- k_j fixed purchasing cost in period j
- c_{ijo} total O&M costs of a vehicle using fuel option o at age i in period j ; this total cost also include insurance and tax savings from depreciation
- m_{ijo} cost of modifying an existing gasoline vehicle to be able to use fuel option o at age i in period j
- r_{ijo} capital gains from selling a vehicle using fuel option o at age i in period j
- u_i utilization of a vehicle at age i ; this parameter captures dependent usage pattern
- d_j total mileages requirement for the fleet in period j
- h_{io} number of vehicles using fuel option o at age i in the initial fleet

Decision variables:

- b_{ijo} number of purchased vehicles using fuel option o at age i in period j

- x_{ijo} number of vehicles using fuel option o at age i that are in the fleet in period j
- t_{ijo} number of vehicles that are modified to use fuel option o at age i in period j
- s_{ijo} number of sold vehicles using fuel option o at age i in period j
- z_j binary variable, which is equal to 1 if a purchasing order is placed at the end of period j , and 0 otherwise

The mathematical model can be formulated as follows.

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{o=1}^O \sum_{j=0}^{T-1} \sum_{i=0}^{N-1} f^j (p_{ijo} b_{ijo} + k_j z_j) \\ & + \sum_{o=1}^O \sum_{j=0}^{T-1} \sum_{i=0}^{N-1} f^{j+1} c_{ijo} x_{ijo} \\ & + \sum_{o=2}^O \sum_{j=0}^{T-1} \sum_{i=0}^{N-1} f^j m_{ijo} t_{ijo} \\ & - \sum_{o=1}^O \sum_{j=0}^T \sum_{i=0}^N f^j r_{ijo} s_{ijo} \end{aligned} \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{o=1}^O \sum_{i=0}^{N-1} u_i x_{ijo} \geq d_j \quad \forall j < T \quad (2)$$

$$b_{ijo} - x_{ijo} = 0 \quad i = 0; \forall j < T; \forall o \quad (3)$$

$$h_{io} - s_{ijo} = 0 \quad i = N; j = 0; \forall o \quad (4)$$

$$h_{io} - x_{ijo} = 0 \quad \forall 0 < i < N; j = 0; \forall o \quad (5)$$

$$\begin{aligned} x_{i-1,j-1,1} + b_{ij1} - x_{ij1} - \sum_{i=2}^O t_{ijo} - s_{ij1} &= 0 \\ \forall 0 < i < N; \forall 0 < j < T \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} x_{i-1,j-1,o} + b_{ijo} - x_{ijo} + t_{ijo} - s_{ijo} &= 0 \\ \forall 0 < i < N; \forall 0 < j < T; \forall o > 1 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} x_{i-1,j-1,o} - s_{ijo} &= 0 \quad i = N; 0 < j < T; \forall o \quad \text{and} \\ \forall i > 0; j = T; \forall o \end{aligned} \quad (8)$$

$$b_{ijo} \leq M z_j \quad \forall i < N; \forall j < T \quad (9)$$

$$b_{ijo}, x_{ijo}, t_{ijo}, s_{ijo} \in \{0, 1, 2, \dots\} \quad \forall i; \forall j; \forall o \quad (10)$$

$$z_j \in \{0, 1\} \quad \forall j < T \quad (11)$$

In the model, the objective function (1) minimizes the total discounted cash flows including purchase costs, O&M costs, costs of modifying fuel options, and gains from salvage values. Constraints (2) specify that the demand is satisfied in every period.

Constraints (3) enforce that all new purchased vehicles must be placed in use. Constraints (4) – (5) indicate initial vehicles in the fleet. Constraints (6) and (7) are flow balance constraints for fuel option 1 (gasoline) vehicles, and for the other fuel option vehicles, respectively. A flow balance network for vehicles at age i in period j is provided in Figure 3. Constraints (8) sell all vehicles at the end of their useful lives, and sell the whole fleet at the end of the planning horizon. Constraints (9) guarantee that a fixed purchasing cost is charged when a purchase is made in any period. Finally, Constraints (10) – (11) declare decision variables.

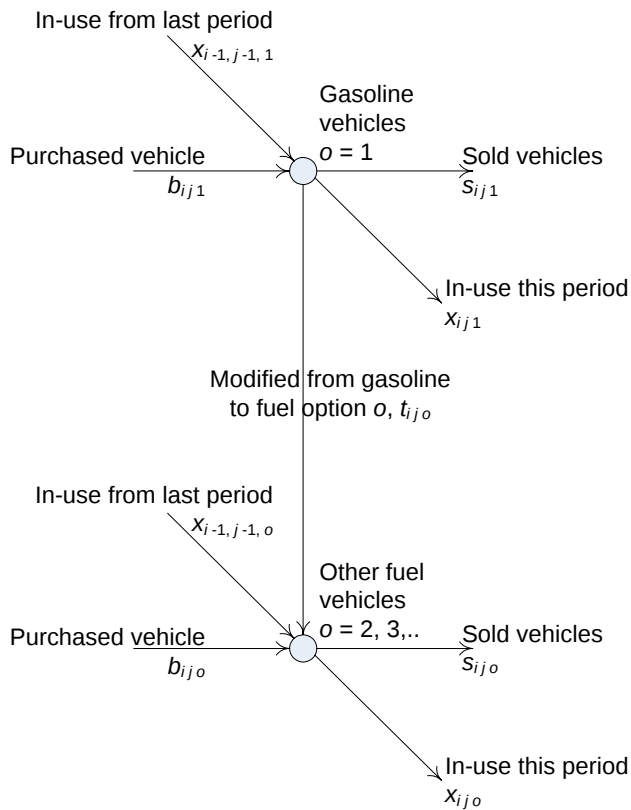


Figure 3 Flow balance network of vehicles at age i in period j

The dependent usage pattern is included in the model through parameters u_i and c_{ijo} by specifying that u_i and all costs associated with utilization (i.e. fuel costs, repair, and maintenance), which are parts of c_{ijo} , follow non-increasing functions of age. These two parameters are estimated at the outset of the model.

Alternative fuel vehicles are incorporated as challengers for vehicle replacement (using b_{ijo}), and as alternatives of modifying fuel option for existing gasoline vehicles in the fleet (using t_{ijo} and m_{ijo}).

The OCRR optimal replacement policy is enforced by adding Constraints (12) and (13) as follows,

$$\sum_{o=1}^O x_{ijo} \leq M y_{ij} \quad \forall i < N; \forall j < T; \forall c \quad (12)$$

$$s_{i-1,j,o} \leq M(1 - y_{ij}) \quad \forall i < N; \forall j < T; \forall c \quad (13)$$

where $y_{ij} = 1$ if there exists vehicle with fuel option o at age i in period j in the fleet, or 0 otherwise

Finally, the new-vehicle-only purchasing policy can be applied by simply adding Constraints (14).

$$b_{ijo} = 0 \quad \forall i > 0; \forall j < T \quad (14)$$

4. NUMERICAL EXAMPLE

4.1. A problem instance

A small example is presented to demonstrate the defined problem. In this example, a fleet of 126 gasoline vehicles provide services to its customers at a total demand of 3.5 million km for period 0. User demands are set to grow at 10% per year. Average utilization of a vehicle is age-based and subject to dependent usage pattern (e.g. a non-increasing function of age similar to Figure 1). The maximum useful life of a vehicle is 10 years.

There are three types of vehicles for replacement based on fuel options: gasoline, liquefied petroleum gas (LPG), and natural gas vehicles (NGV). Fixed purchasing cost and unit purchase cost of a new gasoline vehicle are based on a market price of a 1,600 cc passenger car. Future unit purchase cost is inflated approximately at 2.5% per year (from national average consumer price index). Unit purchase cost of new vehicles using LPG or NGV are higher than that of the same gasoline vehicle by their costs of modifying gasoline engine to use other fuel options. The modifying cost is approximately at 15,000 THB (Thai baht) for gasoline engine to use LPG, and at 40,000 THB to use NGV.

Average operating costs (i.e. fuel costs) per year are age-based according to dependent usage pattern and fuel prices. Future gasoline price is projected linearly based on recent gasoline price data, while future LPG and NGV prices are assumed to remain proportional to the future gasoline's prices. Vehicle models are assumed to be revamped every four years and would reflect in 7% savings in fuel consumption. Insurance, repair, and maintenance costs are all age-based, and are estimated from recent data from vehicle insurance agencies and car dealers, as well as historical fleet data. These O&M costs are also assumed to increase

slightly every year that vehicles get older due to deterioration.

The vehicles depreciate over its useful life of 10 years with depreciation approximated from consumer price index. Every vehicle is assumed to be in-use; therefore, no inventory carrying costs are incurred. Discount factor is assumed at 5%, inflation at 3%, and marginal tax rate for capital recovery at 34%. The problem is solved for a finite planning horizon of 20 years.

4.2. Results and discussion

The problem instance was solved to optimality using CPLEX 9.1.2 four times: including and excluding OCRR in combination with using and not using new-vehicle-only purchasing policy. A close examination at the optimal replacement solutions suggests the following.

OCRR had no effect on the optimal solution, i.e., older vehicles are always replaced before newer ones, regardless of including or excluding OCRR constraints in the model. Allowing used-vehicle purchase led to significant saving in the total cost. In this example, the optimal total discounted cost of operating and owning the fleet over 20-year period reduced from 2.96 to 2.72 billion THB (a saving of 8%).

In the optimal replacement decisions, when consider the age range between 0 and 10 years old (the maximum useful life), it was found that purchased vehicles only range from 0 to 2 years old and sold vehicles range from 7 to 8 years (excluding the sales of the initial fleet and the final fleet). This suggests that there might be a certain maximum age of vehicles to be purchased, and a minimum age of vehicle to be sold that is less than the maximum useful life.

In any period, replacement of old vehicles always occurred in cluster. That is, a cluster of vehicles using the same fuel type at the same age would either be kept in-use or sold all together. This is similar to the so-called no splitting rule (NSR) that was proved optimal policy by Jones *et al.* (1991) under different problem characteristics, utilization pattern, and O&M cost assumptions. This suggests that the NSR rule may also be optimal policy for dependent usage pattern fleets. Mathematical proof of this rule will be a topic for future study.

On the purchasing end, there was always only one optimal vehicle choice (i.e. one type of vehicle at one

age) to purchase in a period. In other words, more than one purchase of vehicles with different type or age never occurred on the same period. However, purchased vehicles did not necessarily occur in cluster. That is, purchase of vehicles type o at age i in period j may be followed by another purchase of the same type of vehicle at age $i+1$ in period $j+1$.

Comparing the two alternative fuels, while both fuel prices are comparable, LPG seems to be a more attractive choice than NGV because of its lower installation cost. Allowing engine modification so that alternative fuel can be used only give a very little saving in the total cost. This is because the initial fleet only contained gasoline vehicles (eligible to engine modification), but subsequent replacements were mostly done with vehicles that already have alternative fuel capability come installed. Thus, there were no needs for further engine modifications in other period than the first one.

5. CONCLUSION

The paper presents an extension of the parallel replacement problem where assets are a fleet of service vehicles that exist to satisfy user demands. Motivated by real operational data from an actual fleet, a realistic pattern of user demands called dependent usage is considered. In addition, with the recent surge in gasoline price and the emergences of alternative fuels, the problem is broadened to include multiple alternative fuel vehicles (LPG and NGV) as challengers for replacement to the gasoline vehicles. A mathematical model of the defined problem is formulated as a linear integer program. Promising results were obtained from solving a small problem instance.

Directions for further study include conducting a more extensive computational study with sensitivity analysis on the model parameters, providing mathematical proofs of some optimal replacement policy for dependent usage fleets, and incorporating some insights learned from solving the problem to optimality into constructing efficient algorithms for the problem.

REFERENCES

- Bean, J. C., Lohmann, J. R., and Smith, R. L., (1994), "Equipment Replacement under Technological Change," *Naval Research Logistics*, 41, 117-128.
- Chen, Z., (1998), "Solution Algorithms for the Parallel Replacement Problem under Economy of Scale," *Naval Research Logistics*, 45, 279-295.

- Fraser, J. M., and Posey J. W., (1989), "A Framework for Replacement Decisions," *European Journal of Operational Research*, 40, 43-57.
- Hartman, J. C., (1999), "A General Procedure for Incorporating Asset Utilization Decisions into Replacement Analysis," *The Engineering Economist*, 44 (3), 217-238.
- Hartman, J. C., (2000), "The Parallel Replacement Problem with Demand and Capital Budgeting Constraints," *Naval Research Logistics*, 47, 40-56.
- Hartman, J. C., (2001), "An Economic Replacement Model with Probabilistic Asset Utilization," *IIE Transactions*, 33, 717-727.
- Hartman, J. C., (2004), "Multiple Asset Replacement Analysis under Variable Utilization and Stochastic Demand," *European Journal of Operational Research*, 159 (1), 145-165.
- Hopp, W. J., Jones, P. C., and Zydiak, J. L., (1993), "A Further Note on Parallel Machine Replacement," *Naval Research Logistics*, 40, 575-579.
- Hopp, W. J., and Nair, S. K., (1991), "Timing Replacement Decisions under Discontinuous Technological Change," *Naval Research Logistics*, 38, 203-220.
- Jones, P. C., Zydiak, J. L., and Hopp, W. J., (1991), "Parallel Machine Replacement," *Naval Research Logistics*, 38, 351-365.
- Karabakal, N., Lohmann, J. R., and Bean, J. C. (1994), "Parallel Replacement under Capital Rationing Constraints," *Management Science*, 40, 305-319.
- Rajagopalan, S., (1998), "Capacity Expansion and Equipment Replacement: A Unified Approach," *Operations Research*, 46 (6) 846-857.
- Tang, J., and Tang, K., (1993), "A Note on Parallel Machine Replacement," *Naval Research Logistics*, 40, 551-555.