

Research Article

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระยะทางการเดินหยิบสินค้าในคลังสินค้ารูป ใบไม้

Factors affecting the picking travel distance in the leaf warehouse

มะกุสี มะแซ^{1*}, วิชชุดา บุญเรือง¹, ภักธิยา หมาดหลู¹ และ ภาณุพงศ์ วิจิตรคุณากร²

Makusee Masae^{1*}, Witchuda Boonreung¹, Phakthiya Hmadhloo¹ and Panupong Vichitkunakorn²

¹หน่วยวิจัยสถิติและการประยุกต์ สาขาวิทยาศาสตร์การคำนวณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประเทศไทย

²หน่วยวิจัยคณิตวิเคราะห์เชิงประยุกต์ สาขาวิทยาศาสตร์การคำนวณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประเทศไทย

¹Statistics and Applications Research Unit, Division of Computational Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Thailand

²Applied Analysis Research Unit, Division of Computational Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Thailand

*E-mail: makusee.ma@psu.ac.th

Received: 27/03/2021; Revised: 16/10/2021; Accepted: 16/11/2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินปัจจัยที่สำคัญที่ปัจจัยในการจัดการคลังสินค้า ได้แก่ วิธีการเดินหยิบสินค้า วิธีการเก็บสินค้า ขนาดของคลังสินค้า และขนาดของใบสั่งซื้อ ที่มีผลต่อระยะทางรวมที่ใช้ในการเดินหยิบสินค้าในคลังสินค้าที่มีลักษณะเป็นรูปใบไม้ โดยผู้วิจัยได้จำลองสถานการณ์และใช้ผลลัพธ์จากการจำลองไปศึกษาอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมของปัจจัยต่าง ๆ ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยทั้งสี่มีผลต่อระยะทางการเดินของพนักงานหยิบสินค้าและพบว่าการเดินหยิบสินค้าแบบฮิวริสติกส์ที่ต่างกันมีผลต่อระยะทางการเดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเดินหยิบสินค้าที่สั้นที่สุดแบบแม่นยำตรง (Exact) พบว่าวิธีฮิวริสติกส์แบบ Leaf S-shape มีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีฮิวริสติกส์แบบ Leaf largest gap โดยระยะทางการเดินหยิบสินค้าเฉลี่ยของวิธีฮิวริสติกส์แบบ Leaf S-shape และ Leaf largest gap แตกต่างจากวิธีเดินหยิบสินค้าที่สั้นที่สุดแบบแม่นยำตรงอยู่ในช่วง 18-28% และ 31-37% ตามลำดับ

คำสำคัญ: คลังสินค้า, การหยิบสินค้า, การเดินหยิบสินค้า, การเก็บสินค้า

Abstract

The research aims to evaluate the effects of four main factors, including order picker routing policies, storage assignment policies, warehouse sizes, and pick-list sizes, on the picking travel distance in leaf warehouses. The simulations of all possible combinations of levels were created which the outputs from them were, then, used as the inputs for a statistical study assessing the main and interaction effects from different factors. The result indicated that the four-factor interaction had a statistically significant effect on the picking travel distance. The two heuristics showed statistically significant different average travel distances. Comparing to the exact shortest routing, the Leaf S-shape outperformed the Leaf largest-gap with optimal gaps of 18-28% and 31-37%, respectively.

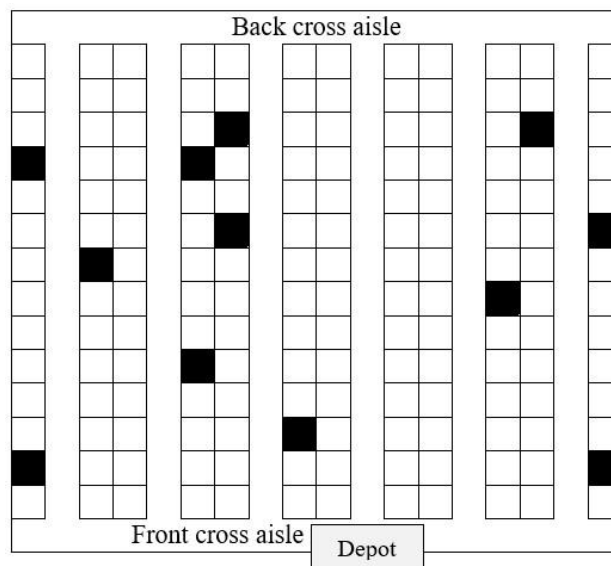
Keywords: warehousing, order picking, order picker routing, storage assignment

บทนำ

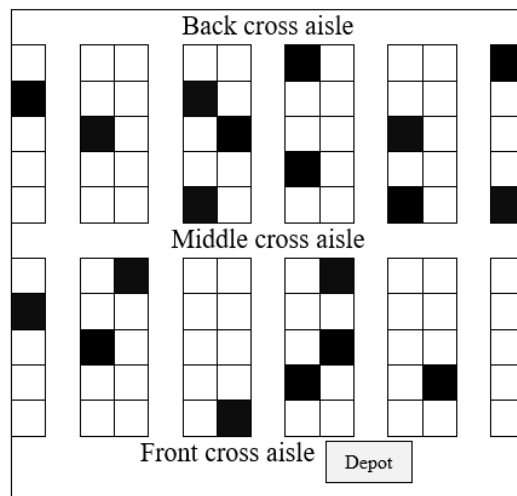
คลังสินค้ามีบทบาทสำคัญต่อระบบโลจิสติกส์เพราะทำหน้าที่เก็บสินค้าก่อนส่งสินค้าไปยังลูกค้า การจัดการคลังสินค้าอย่างมีประสิทธิภาพจะช่วยลดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็นและช่วยให้สามารถส่งสินค้าให้กับลูกค้าได้ทันเวลาที่กำหนด นักวิจัยและผู้ประกอบการได้มีการศึกษา ปรับปรุง พัฒนาการดำเนินการในคลังสินค้าให้มีความรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ กระบวนการในคลังสินค้าประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ๆ คือ การรับสินค้าจากผู้ผลิต การเก็บสินค้าเข้าคลังสินค้า การหยิบสินค้าจากที่เก็บสินค้า และการส่งสินค้าไปยังลูกค้า (De Koster et al., 2007; Çelik & Süral, 2014; Grosse et al., 2017) กระบวนการที่กล่าวมาทั้งหมดพบว่าขั้นตอนการหยิบสินค้า (order picking) จากที่เก็บสินค้าในคลังสินค้าใช้เวลาและแรงงานมาก ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สูงและคิดเป็นสัดส่วนที่มากเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้นในคลังสินค้า (Won & Olafsson, 2005; Bukchin et al., 2012; Pansart et al., 2018) การหยิบสินค้าเริ่มจากพนักงานรับใบสั่งซื้อที่จุดเริ่มต้นที่เรียกว่าจุด depot จากนั้นพนักงานจะเดินไปยังตำแหน่งที่เก็บสินค้าแต่ละตำแหน่งในคลังสินค้า และเมื่อหยิบสินค้าครบตามใบสั่งซื้อแล้วพนักงานก็จะเดินกลับมายังจุด depot อีกครั้ง จากรูปที่ 1-3 แสดงการหยิบสินค้าในคลังสินค้าที่มีลักษณะเป็นแบบหนึ่งบล็อก สองบล็อก และรูปใบไม้ ตามลำดับ โดยกล่องสี่เหลี่ยมที่แรเงาด้วยสีดำแทนตำแหน่งของสินค้าที่ปรากฏในใบสั่งซื้อที่ผู้หยิบสินค้าต้องเดินไปหยิบ การลดเวลาที่ไม่ก่อให้เกิดประโยชน์และไม่เพิ่มมูลค่าจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการลดต้นทุนการดำเนินงานของคลังสินค้า และเพิ่มประสิทธิภาพของการหยิบสินค้า เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายในการหยิบสินค้า งานวิจัยในอดีตได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อระยะทางการเดินหยิบสินค้าและพบว่าหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะทางการเดินหยิบสินค้าในคลังสินค้า เช่น วิธีการเดินหยิบสินค้า การเก็บสินค้าในคลังสินค้า ขนาดของคลังสินค้า และขนาดของใบสั่งซื้อ เป็นต้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปยังคลังสินค้าที่มี

ลักษณะเป็นแบบหนึ่งบล็อกดังรูปที่ 1 หรือสองบล็อกดังรูปที่ 2 แต่ยังไม่มีการศึกษาในคลังสินค้าที่มีลักษณะเป็นรูป

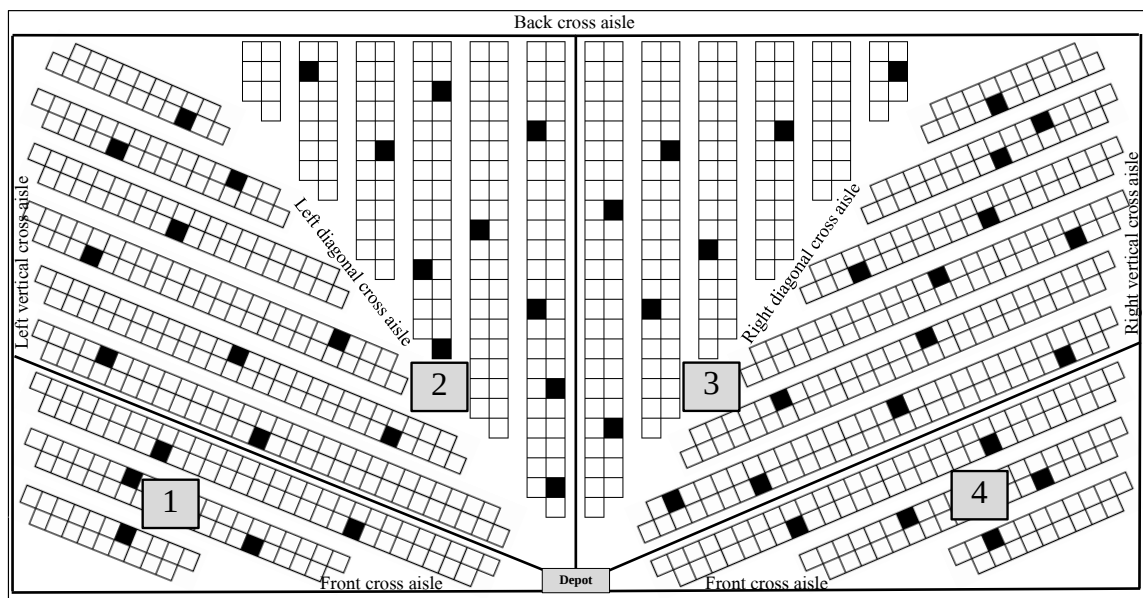
ไบไม่ดังรูปที่ 3 โดยคลังสินค้านี้มีเพียงการศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบผังของคลังสินค้า (Öztürkoglu et al., 2012) และการเดินหยิบสินค้า (Masae et al., 2021) นอกจากนี้งานวิจัยของ Pohl et al. (2009) และ Çelik & Süral (2014) พบว่าการเดินหยิบสินค้าในคลังสินค้าที่ไม่ใช่แบบบล็อกสามารถลดระยะทางการเดินหยิบสินค้าในบางกรณีได้ ผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นความสำคัญและประโยชน์ของคลังสินค้าที่ไม่ใช่แบบบล็อก ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระยะทางการเดินหยิบสินค้าในคลังสินค้านี้ โดยผู้วิจัยได้ทำการจำลองสถานการณ์การดำเนินการในคลังสินค้าผ่านการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และนำผลที่ได้จากการจำลองไปประเมินอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ โดยใช้เครื่องมือทางสถิติ ซึ่งผลการวิจัยจะเป็นประโยชน์ต่อนักวิจัยและผู้ประกอบการในการจัดการการหยิบสินค้าในคลังสินค้านี้ต่อไป



รูปที่ 1 คลังสินค้าแบบหนึ่งบล็อก



รูปที่ 2 คลังสินค้าแบบสองบลิ๊อค



รูปที่ 3 คลังสินค้ารูปใบไม้ (Masae et al., 2021)

วิธีการทดลอง

1. ลักษณะทั่วไปของคลังสินค้า

คลังสินค้าที่ศึกษาเป็นคลังสินค้ารูปใบไม้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Öztürkoglu et al. (2012) ดังแสดงในรูปที่ 3 จะเห็นว่าคลังสินค้าประกอบด้วยทางเดินตามขวางตามแนวนอนด้านหน้าและหลัง (front and back cross aisles) ทางเดินตามแนวตั้งด้านซ้ายและขวา (left and right vertical cross aisles) และทางเดินตามเส้นทแยงมุมด้านซ้ายและขวา (left and right diagonal cross aisles) คลังสินค้ารูปใบไม้แบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน (ตามตัวเลขที่ปรากฏในรูปที่ 3) โดยส่วนที่ 1 กับ 4 และ 2 กับ 3 มีจำนวนทางเดินหยิบสินค้าเท่ากัน คลังสินค้ามีจุด depot แต่ละตำแหน่ง ตั้งอยู่ตรงจุดกึ่งกลางของทางเดินตามแนวนอนด้านหน้า กระบวนการหยิบสินค้าเริ่มต้นจากพนักงานหยิบสินค้ารับใบสั่งซื้อที่จุด depot โดยใบสั่งซื้อนี้จะบอกจำนวนและตำแหน่งของสินค้าที่ต้องไปหยิบ (ตำแหน่งที่แทนด้วยกล่องสีดำในรูปที่ 3) เมื่อพนักงานหยิบสินค้าทุกชิ้นที่ปรากฏในใบสั่งซื้อเสร็จ ก็จะนำสินค้าที่หยิบมาทั้งหมดกลับมายังตำแหน่ง depot โดยคลังสินค้าที่ศึกษานี้เป็นคลังสินค้าที่มีทางเดินหยิบสินค้าที่แคบซึ่งจะทำให้พนักงานหยิบสินค้าสามารถหยิบสินค้าจากทั้งสองฝั่งของทางเดินได้โดยไม่มีการเพิ่มระยะทางและเวลาในการเดินส่วนนี้ นอกจากนี้คลังสินค้าประกอบด้วยชั้นวางที่มีความสูงระดับที่ผู้หยิบสามารถหยิบสินค้าได้โดยตรงโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์เคลื่อนที่ในแนวตั้ง

2. การออกแบบการทดลอง

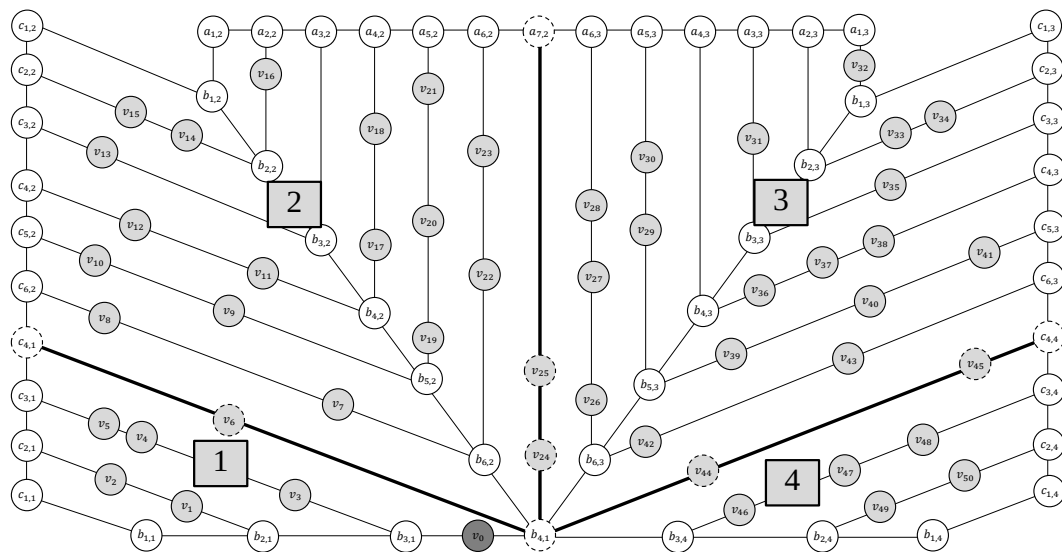
ผู้วิจัยประยุกต์แผนแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (full factorial design) ในการศึกษาอิทธิพลหลัก (main effect) ซึ่งเป็นอิทธิพลของปัจจัยหนึ่งที่มีต่อระยะทางการเดินหยิบสินค้าและอิทธิพลร่วม (interaction effect) ซึ่งเป็นอิทธิพลของปัจจัยตั้งแต่สองปัจจัยขึ้นไปซึ่งมีความเกี่ยวพันกันที่มีต่อระยะทางการเดินหยิบสินค้า โดยปัจจัยที่ศึกษามีดังต่อไปนี้

2.1 วิธีการเดินหยิบสินค้า (Routing) ผู้วิจัยพิจารณา 3 ระดับ (level) คือ วิธีแม่นยำตรง (Exact) วิธีฮิวริสติกส์แบบ Leaf S-shape และวิธีฮิวริสติกส์แบบ Leaf largest gap ซึ่งถูกเสนอโดย Masae et al. (2021) โดยสามารถสรุปวิธีการเดินหยิบสินค้าแต่ละวิธีได้ดังนี้

วิธีแม่นยำตรง (Exact-E) Masae et al. (2021) ประยุกต์วิธีการเดินหยิบสินค้าแบบแม่นยำตรงที่ใช้ในคลังสินค้าแบบหนึ่งบล็อกและสองบล็อกที่เสนอโดย Ratliff & Rosenthal (1983) Roodbergen & De Koster (2001) ตามลำดับ โดยปรับใช้กับคลังสินค้ารูปใบไม้ สมมติมีสินค้าทั้งหมดที่ต้องไปหยิบ m ชิ้น Masae et al. (2021) ได้แปลงการหาเส้นทางเดินหยิบสินค้า m ชิ้นในคลังสินค้าให้เป็นปัญหาการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดบนกราฟตัวแทนของคลังสินค้า (graph representation) เริ่มต้น Masae et al. (2021) ได้สร้างกราฟตัวแทนของปัญหาดังรูปที่ 4 โดยจุด (vertex) แต่ละจุดในกราฟจะแทนตำแหน่งของสินค้าในใบสั่งซื้อ จุดตัดระหว่างทางเดิน และจุด depot ส่วนเส้น

เชื่อม (edge) แต่ละเส้นบนกราฟจะเชื่อมจุดสองจุดที่สามารถเดินทางถึงกันได้ โดยความยาวของเส้นเชื่อมมีค่าเท่ากับระยะห่างระหว่างจุดปลายทางทั้งสอง หรือระยะทางการเดินทางจริงในคลังสินค้า

เนื่องจากพนักงานหยิบสินค้าต้องเดินผ่านทุกจุดที่แทนตำแหน่งของสินค้าและต้องเดินกลับมายังจุด depot ดังนั้นปัญหาการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดบนกราฟจึงถูกแปลงมาเป็นปัญหาการหากราฟย่อยเชื่อมโยงที่สั้นที่สุดที่บรรจุจุด depot (จุด v_0 ในรูปที่ 4) และทุกจุดที่แทนตำแหน่งของสินค้า (จุด v_j ในรูปที่ 4) โดยไม่จำเป็นต้องเดินผ่านจุดตัดระหว่างทางเดิน (จุด $a_{i,j}$, $b_{i,j}$ และ $c_{i,j}$ ในรูปที่ 4) ทุกจุด จากทฤษฎีของกราฟออยเลอร์ (Eulerian graph theorem) ทำให้ทราบว่าทุกจุดในกราฟย่อยจะมีดีกรีเป็นจำนวนคู่ ซึ่งช่วยลดกรณีในการพิจารณาไปได้จำนวนหนึ่ง จากนั้น Masae et al. (2021) ได้ประยุกต์ใช้กำหนดการพลศาสตร์ (dynamic programming) เพื่อหากราฟย่อยที่ต้องการ

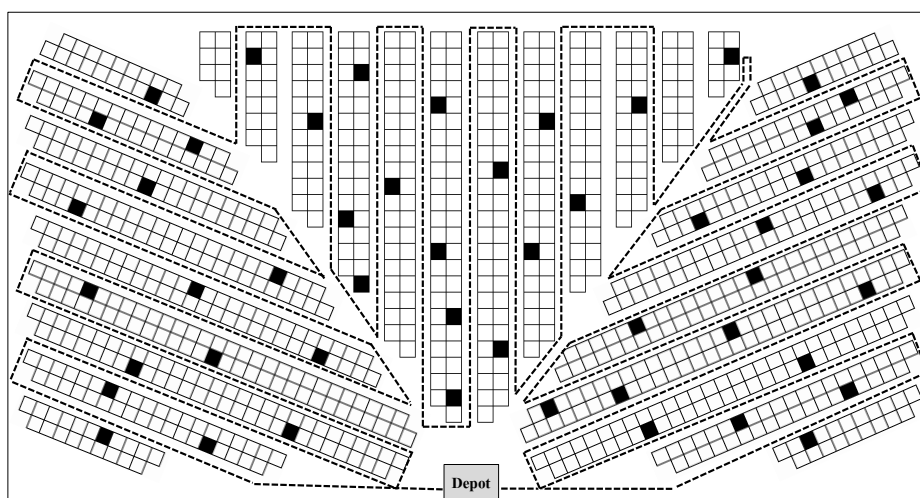


รูปที่ 4 กราฟตัวแทน (graph representation) ของปัญหาในคลังสินค้านำรูปแบบ (Masae et al., 2021)

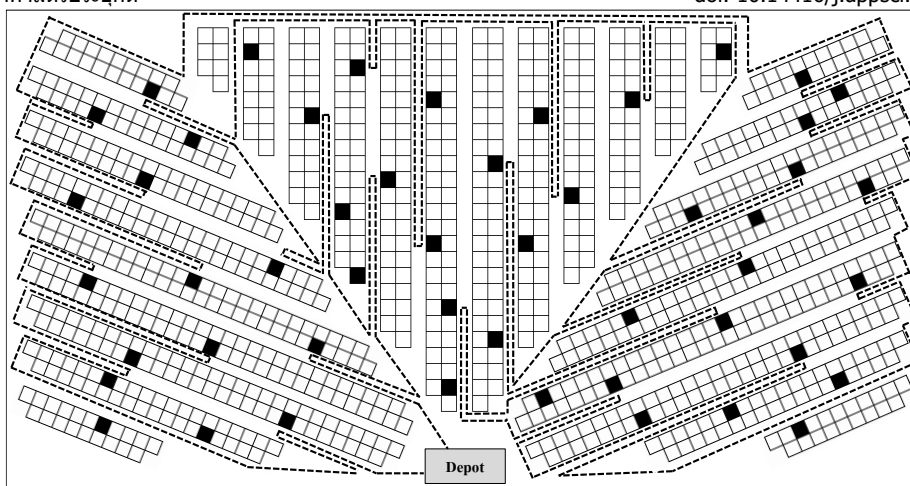
วิธีการเดินหยิบสินค้าแบบฮิวริสติกส์ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในทางอุตสาหกรรมเพราะมีเส้นทางเดินที่ง่ายต่อการจดจำของผู้หยิบสินค้า (Masae et al., 2020a) ทำให้สามารถหยิบสินค้าได้อย่างรวดเร็วและลดความผิดพลาดในการหยิบสินค้าได้

วิธี Leaf-S-shape (LS) Masae et al. (2021) แบ่งคลังสินค้าออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนซ้าย ส่วนกลาง และส่วนขวา พนักงานหยิบสินค้าเริ่มต้นโดยการรับใบสั่งซื้อที่จุด depot จากนั้นพนักงานหยิบสินค้าจะหยิบสินค้าเริ่มจากส่วนซ้าย ส่วนกลาง และส่วนขวา ตามลำดับ โดยจะเดินเก็บสินค้าเป็นรูปตัว S เมื่อหยิบสินค้าครบทุกชิ้น (ผ่านจุดค้าทุกจุด) พนักงานจะเดินกลับมายังจุด depot ดังแสดงในรูปที่ 5

วิธี *Leaf largest gap (LL)* การเดินโดยวิธีนี้สามารถแสดงได้ในรูปที่ 6 วิธีนี้จะแบ่งทางเดินหีบสินค้าออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนบนและส่วนล่างโดยใช้ระยะห่างที่มากที่สุด (largest gap) ในทางเดินเป็นตัวแบ่ง โดยระยะห่างที่มากที่สุดนี้ อาจจะเป็นระยะห่างระหว่างตำแหน่งของสินค้าสองตำแหน่งที่ต้องหีบภายในทางเดินนั้น หรือเป็นระยะห่างระหว่างตำแหน่งของสินค้าที่ต้องหีบกับทางออกของทางเดิน โดยการเดินหีบสินค้าในแต่ละทางเดินที่มีสินค้าจะไม่ผ่านระยะห่างที่มากที่สุด



รูปที่ 5 เส้นทางการเดินของวิธีการเดินหีบสินค้าแบบ LS (Masae et al., 2021)



รูปที่ 6 เส้นทางเดินของวิธีการเดินหิบบินค้าแบบ LL (Masae et al., 2021)

2.2 วิธีการเก็บสินค้าในคลังสินค้า (Storage) ซึ่งจะพิจารณาด้วยกัน 4 ระดับ (level) คือ การเก็บสินค้าแบบสุ่ม (random storage; R) การเก็บตามการหมุนเวียนที่มีความเบ้ของความต้องการแบบ 20/40, 20/60 และ 20/80 (turnover-based with 20/40, 20/60, and 20/80 demand skewness; TB1, TB2, TB3)

การเก็บสินค้าแบบสุ่ม เป็นการเก็บสินค้า ณ ตำแหน่งที่ว่างในคลังสินค้า ณ เวลานั้น ซึ่งชนิดสินค้าที่จะเข้ามาเก็บในคลังสินค้า ณ ตำแหน่งใด ๆ ไม่จำเป็นต้องเป็นสินค้าที่เคยอยู่ที่ตำแหน่งนั้นมาก่อน หมายความว่าไม่มีการเจาะจงพื้นที่เก็บของสินค้าแต่ละชนิด การเก็บสินค้าวิธีนี้เป็นการเก็บสินค้าที่ง่ายเพราะไม่ต้องอาศัยการจัดระเบียบที่ซับซ้อน

การเก็บตามการหมุนเวียนที่มีความเบ้ของความต้องการ เป็นการเก็บสินค้าที่มีความต้องการสูงให้อยู่ใกล้กับตำแหน่ง depot นั่นคือระยะทางจาก depot ของสินค้าชนิดหนึ่ง ๆ จะแปรผันตรงกับความน่าจะเป็นที่สินค้าชนิดนั้นจะปรากฏอยู่ในใบสั่งซื้อ ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้ปรับวิธีการจำลองการเก็บสินค้าตามการหมุนเวียนที่นำเสนอโดย Pohl et al. (2009) และ Çelik & Süral (2014) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

กำหนดให้คลังสินค้ามีตำแหน่งเก็บสินค้าทั้งหมด N ตำแหน่ง เรียงตามระยะทางจาก depot จากน้อยไปมาก นั่นคือ ตำแหน่งที่ 1 จะอยู่ใกล้กับ depot ที่สุด และตำแหน่งที่ N จะอยู่ไกลที่สุด

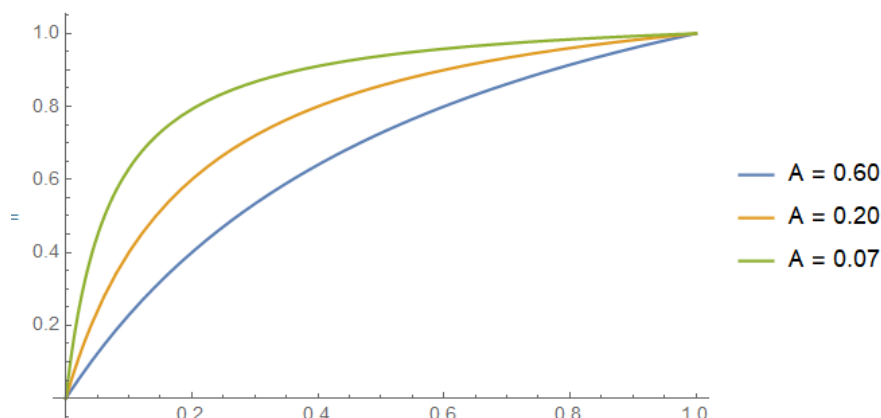
ให้ p_i แทนความต้องการของสินค้า (demand) (ความน่าจะเป็นที่สินค้าจะปรากฏในใบสั่งซื้อ) ในตำแหน่งที่ i สำหรับ $i = 1, 2, 3, \dots, N$ จากนั้นจะจำลองค่า p_i ที่สินค้าในตำแหน่งที่ i จะปรากฏในใบสั่งซื้อสำหรับทุก $i = 1, 2, 3, \dots, N$ โดยที่

$$p_i = F\left(\frac{i}{N}\right) - F\left(\frac{i-1}{N}\right) \quad (1)$$

เมื่อ $F(x)$ เป็นฟังก์ชันเพิ่มที่มีกราฟเว้าลง (concave down) (Bender, 1981) โดยที่

$$F(x) = \frac{(1+A)x}{A+x} \quad (2)$$

สำหรับ $x \in [0,1]$ และ $F(x)$ มีพารามิเตอร์ A ที่ทำให้ความเว้าของกราฟของฟังก์ชันเปลี่ยนไป ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟของ $F(x)$ ที่ $A = 0.60, A = 0.20$ และ $A = 0.07$

เนื่องจาก $F(x)$ เป็นฟังก์ชันเพิ่มที่มีกราฟเว้าลง จะได้ $p_1 \geq p_2 \geq \dots \geq p_N$ ดังเช่นตัวอย่างในรูปที่ 8 สำหรับกรณี $A = 0.2$ และ $N = 10$ โดยเราจะได้

$$\begin{aligned} p_1 &= F(0.1) - F(0) = 0.4 - 0 = 0.4 \\ p_2 &= F(0.2) - F(0.1) = 0.6 - 0.4 = 0.2 \\ p_3 &= F(0.3) - F(0.2) = 0.72 - 0.6 = 0.12 \\ p_4 &= F(0.4) - F(0.3) = 0.8 - 0.72 = 0.08 \\ &\vdots \\ p_{10} &= F(1) - F(0.9) = 1 - 0.98 = 0.01 \end{aligned}$$

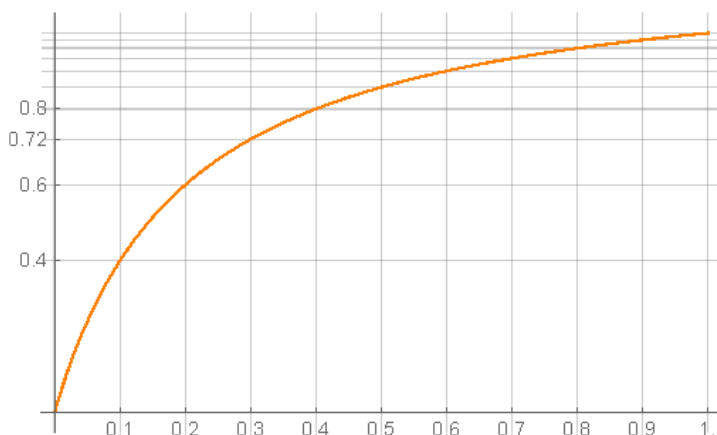
ในรูปที่ 7 จะพบว่า ถ้าค่า A ยิ่งน้อย กราฟของ $F(x)$ จะยิ่งมีค่าความเว้ามากขึ้น โดยค่าความเว้าของ $F(x)$ ที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ผลต่างระหว่าง p_1 และ p_N มีค่าสูงขึ้น และทำให้ความแตกต่างระหว่างความต้องการสินค้าแต่ละชั้นมีค่าสูงขึ้น เราเรียกความแตกต่างดังกล่าวว่าความเบ้ของความต้องการสินค้า (demand skewness) (ความเบ้นี้แตกต่างจากความเบ้ทางสถิติที่มีค่าเท่ากับ $\frac{\text{mean}-\text{median}}{SD}$) โดยในงานวิจัยนี้เราจะกล่าวถึงความเบ้ดังกล่าวด้วยค่า $F(0.2)$ ซึ่งมีค่าเท่ากับความต้องการรวมของสินค้าที่มีความต้องการสูงสุด 20% แรก เช่น

สำหรับ $A = 0.60$ จะได้ $F(0.2) = 0.4 = 40\%$ เราใช้สัญลักษณ์ 20/40

สำหรับ $A = 0.20$ จะได้ $F(0.2) = 0.6 = 60\%$ เราใช้สัญลักษณ์ 20/60

สำหรับ $A = 0.07$ จะได้ $F(0.2) \approx 0.8 = 80\%$ เราใช้สัญลักษณ์ 20/80

ในงานวิจัยนี้ จะพิจารณาการเก็บสินค้าตามการหมุนเวียนที่มีความเบ้ของความต้องการแบบ 20/40, 20/60 และ 20/80 โดยจะแทนด้วย TB1, TB2 และ TB3 ตามลำดับ



รูปที่ 8 กราฟของ $F(x)$ ที่ $A = 0.20$ และ $N = 10$

2.3 ขนาดของคลังสินค้า ซึ่งจะพิจารณา 3 ระดับ (level) ได้แก่ คลังสินค้าที่มีจำนวนทางเดินเท่ากับ 21, 27 และ 33 ทางเดิน และให้แทนด้วย WZ1, WZ2, และ WZ3 ตามลำดับ

2.4 ขนาดของใบสั่งซื้อ โดยพิจารณา 3 ระดับ (level) ได้แก่ ขนาด 10, 20 และ 30 รายการ

ปัจจัยการทดลองและระดับที่ใช้ในการทดลองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1 จากนั้นนำปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัยมาทำการออกแบบการทดลองแบบ $3 \times 4 \times 3 \times 3$ แฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (full factorial design) โดยแต่ละตัวแบบจะทำการจำลองข้อมูลในโปรแกรมจาวา (Java) เพื่อที่จะประมาณค่าเฉลี่ยของระยะทางการเดินหยิบสินค้าในคลังสินค้า

ตารางที่ 1 ปัจจัยการทดลองและระดับที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย (factor)	จำนวนระดับ (number of levels)	ระดับ (levels)
วิธีการเดินหีบสินค้า (routing)	3	Exact, LS, LL
วิธีการเก็บสินค้า (storage)	4	R, TB1, TB2, TB3
ขนาดคลังสินค้า (warehouse sizes)	3	WZ1, WZ2, WZ3
ขนาดของใบสั่งซื้อ (pick-list sizes)	3	10, 20, 30

ตัวแบบสถิติสำหรับการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปที่มี 4 ปัจจัยเขียนได้ดังนี้

$$y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \lambda_l + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\alpha\lambda)_{il} + (\beta\gamma)_{jk} + (\beta\lambda)_{jl} + (\gamma\lambda)_{kl} \\ + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + (\alpha\beta\lambda)_{ijl} + (\alpha\gamma\lambda)_{ikl} + (\beta\gamma\lambda)_{jkl} + (\alpha\beta\gamma\lambda)_{ijkl} + e_{ijkl}m$$

$i = 1,2,3; j = 1,2,3,4; k = 1,2,3; l = 1,2,3; m = 1,2,3, \dots, 30$

โดยที่

y_{ijkl}	แทนระยะทางการเดินที่ได้รับทริตเมนต์ $ijkl$ ตัวที่ m
μ	แทนค่าเฉลี่ยระยะทางการเดินทั้งหมด
α_i	แทนอิทธิพลของปัจจัยวิธีการเดินหีบสินค้าที่มี 3 ระดับ
β_j	แทนอิทธิพลของปัจจัยวิธีการเก็บสินค้าที่มี 4 ระดับ
γ_k	แทนอิทธิพลของปัจจัยขนาดคลังสินค้าที่มี 3 ระดับ
λ_l	แทนอิทธิพลของปัจจัยขนาดของใบสั่งซื้อที่มี 3 ระดับ
$(\alpha\beta)_{ij}$	แทนอิทธิพลร่วมของปัจจัยวิธีการเดินหีบสินค้าและวิธีการเก็บสินค้า
$(\alpha\gamma)_{ik}$	แทนอิทธิพลร่วมของปัจจัยวิธีการเดินหีบสินค้าและขนาดคลังสินค้า
$(\alpha\lambda)_{il}$	แทนอิทธิพลร่วมของปัจจัยวิธีการเดินหีบสินค้าและขนาดของใบสั่งซื้อ
$(\beta\gamma)_{jk}$	แทนอิทธิพลร่วมของปัจจัยวิธีการเก็บสินค้าและขนาดคลังสินค้า
$(\beta\lambda)_{jl}$	แทนอิทธิพลร่วมของปัจจัยวิธีการเก็บสินค้าและขนาดของใบสั่งซื้อ
$(\gamma\lambda)_{kl}$	แทนอิทธิพลร่วมของปัจจัยขนาดคลังสินค้าและขนาดของใบสั่งซื้อ
$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$	แทนอิทธิพลร่วมของปัจจัยวิธีการเดินหีบสินค้า วิธีการเก็บสินค้า และขนาดคลังสินค้า
$(\alpha\beta\lambda)_{ijl}$	แทนอิทธิพลร่วมของปัจจัยวิธีการเดินหีบสินค้า วิธีการเก็บสินค้า และขนาดของใบสั่งซื้อ
$(\alpha\gamma\lambda)_{ikl}$	แทนอิทธิพลร่วมของปัจจัยวิธีการเดินหีบสินค้า ขนาดคลังสินค้า และขนาดของใบสั่งซื้อ
$(\beta\gamma\lambda)_{jkl}$	แทนอิทธิพลร่วมของปัจจัยวิธีการเก็บสินค้า ขนาดคลังสินค้า และขนาดของใบสั่งซื้อ

$(\alpha\beta\gamma\lambda)_{ijkl}$ แทนอิทธิพลร่วมของปัจจัยวิธีการเดินหีบสินค้า วิธีการเก็บสินค้า ขนาดคลังสินค้า และขนาดของใบสั่งซื้อ

e_{ijklm} แทนความคลาดเคลื่อนสุ่มของการทดลอง

โดยต้องทดสอบสมมติฐานทางสถิติต่อไปนี้

1. การทดสอบอิทธิพลหลัก

การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยวิธีการเดินหีบสินค้า

$$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0, H_1: \alpha_i \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า เมื่อ } i = 1, 2, 3$$

การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยวิธีการเก็บสินค้า

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0, H_1: \beta_j \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า เมื่อ } j = 1, 2, 3, 4$$

การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยขนาดคลังสินค้า

$$H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 0, H_1: \gamma_k \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า เมื่อ } k = 1, 2, 3$$

การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยขนาดของใบสั่งซื้อ

$$H_0: \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0, H_1: \lambda_l \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า เมื่อ } l = 1, 2, 3$$

2. การทดสอบอิทธิพลร่วม

2.1 อิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย

การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยวิธีการเดินหีบสินค้าและวิธีการเก็บสินค้า

$$H_0: (\alpha\beta)_{ij} = 0, H_1: (\alpha\beta)_{ij} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยวิธีการเดินหีบสินค้าและขนาดคลังสินค้า

$$H_0: (\alpha\gamma)_{ik} = 0, H_1: (\alpha\gamma)_{ik} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยวิธีการเดินหีบสินค้าและขนาดของใบสั่งซื้อ

$$H_0: (\alpha\lambda)_{il} = 0, H_1: (\alpha\lambda)_{il} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยวิธีการเก็บสินค้าและขนาดคลังสินค้า

$$H_0: (\beta\gamma)_{jk} = 0, H_1: (\beta\gamma)_{jk} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยวิธีการเก็บสินค้าและขนาดของใบสั่งซื้อ

$$H_0: (\beta\lambda)_{jl} = 0, H_1: (\beta\lambda)_{jl} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

การทดสอบสมมติฐานขนาดคลังสินค้าและขนาดของใบสั่งซื้อ

$$H_0: (\gamma\lambda)_{kl} = 0, H_1: (\gamma\lambda)_{kl} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

2.2 อิทธิพลร่วม 3 ปัจจัย

การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยวิธีการเดินหีบสินค้า วิธีการเก็บสินค้า และขนาดคลังสินค้า

$H_0: (\alpha\beta\gamma)_{ijk} = 0, H_1: (\alpha\beta\gamma)_{ijk} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยวิธีการเดินหีบสินค้า วิธีการเก็บสินค้า และขนาดของใบสั่งซื้อ

$H_0: (\alpha\beta\lambda)_{ijl} = 0, H_1: (\alpha\beta\lambda)_{ijl} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยวิธีการเดินหีบสินค้า ขนาดคลังสินค้า และขนาดของใบสั่งซื้อ

$H_0: (\alpha\gamma\lambda)_{ikl} = 0, H_1: (\alpha\gamma\lambda)_{ikl} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยวิธีการเก็บสินค้า ขนาดคลังสินค้า และขนาดของใบสั่งซื้อ

$H_0: (\beta\gamma\lambda)_{jkl} = 0, H_1: (\beta\gamma\lambda)_{jkl} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

2.3 อิทธิพลร่วม 4 ปัจจัย

การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยวิธีการเดินหีบสินค้า วิธีการเก็บสินค้า ขนาดคลังสินค้า และขนาดของใบสั่งซื้อ

$H_0: (\alpha\beta\gamma\lambda)_{ijkl} = 0, H_1: (\alpha\beta\gamma\lambda)_{ijkl} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

2.5 การจำลองสถานการณ์ สำหรับแต่ละระดับของขนาดคลังสินค้าและขนาดใบสั่งซื้อ สินค้าแต่ละชิ้นจะถูกแทนด้วยตำแหน่งในคลังสินค้า ตำแหน่งในคลังสินค้าทั้งหมดจะถูกเรียงโดยพิจารณาจากระยะทางไปยังจุด depot

โดยเรียงจากระยะทางน้อยไปมาก นั่นคือ ตำแหน่ง $i = 1$ จะเป็นตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับจุด depot มากที่สุด สำหรับตำแหน่งที่มีระยะทางเท่ากัน ลำดับของตำแหน่งเหล่านั้นจะถูกเลือกอย่างสุ่ม

สำหรับในกรณีของการเก็บสินค้าแบบสุ่ม ใบสั่งซื้อจะถูกสร้างขึ้นโดยการสุ่มสินค้า (ตำแหน่งของสินค้า) ทีละชิ้นไปจนกระทั่งได้จำนวนสินค้าเท่ากับขนาดของใบสั่งซื้อ โดยสุ่มจำนวนเต็มในช่วง 1 ถึง N เมื่อ N คือจำนวนตำแหน่งทั้งหมดในคลังสินค้า

สำหรับในกรณีของการเก็บตามการหมุนเวียนที่มีความเบ้ของความต้องการ เราพิจารณาสามระดับของการเก็บสินค้าโดยใช้ฟังก์ชัน $F(x)$ ที่มีค่า A เท่ากับ 0.60, 0.20 และ 0.07 ตามลำดับ ในแต่ละระดับดังกล่าว ใบสั่งซื้อจะถูกสร้างขึ้นโดยการสุ่มสินค้า (ตำแหน่งของสินค้า) ทีละชิ้นไปจนกระทั่งได้จำนวนสินค้าเท่ากับขนาดของใบสั่งซื้อ โดยการสุ่มสินค้าแต่ละชิ้นเกิดจากการสุ่มจำนวนจริง $x \in [0,1]$ จากนั้นหาค่า i ที่ทำให้ $F\left(\frac{i-1}{N}\right) < x \leq F\left(\frac{i}{N}\right)$ ที่แปลความหมายได้ว่า สินค้าในตำแหน่งที่ i จะปรากฏในใบสั่งซื้อ

ในแต่ละระดับของขนาดคลังสินค้า ขนาดใบสั่งซื้อ และการเก็บสินค้า เราสร้างใบสั่งซื้อทั้งหมด 30 ใบ จากนั้นพิจารณาการหีบสินค้าทั้ง 3 แบบกับแต่ละใบสั่งซื้อ แล้วจึงหาค่าเฉลี่ยของระยะการเดินหีบสินค้าจากใบสั่งซื้อทั้ง 30 ใบดังกล่าว

ผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนข้อมูล (Analysis of variance: ANOVA) (ตารางที่ 2) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าปัจจัยหลักทุก ๆ ปัจจัยมีอิทธิพลต่อระยะทางการเดินหีบสินค้าในคลังสินค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยจะเห็นได้จากผลการทดสอบความแตกต่างของวิธีการเดินหีบสินค้าทั้ง 3 วิธีได้ค่าสถิติ F เท่ากับ 1613932.433 และค่า $p\text{-value} < 0.001$ แสดงว่าวิธีการเดินหีบสินค้ามีผลต่อระยะทางการเดินหีบสินค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และผลการทดสอบการเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple comparison) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าระยะทางการเดินหีบสินค้าเฉลี่ยของทั้งสามวิธีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการทดสอบความแตกต่างของวิธีการเก็บสินค้าทั้ง 4 วิธีได้ค่าสถิติ F เท่ากับ 907588.470 และค่า $p\text{-value} < 0.001$ แสดงว่าวิธีการเก็บสินค้ามีผลต่อระยะทางการเดินหีบสินค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการทดสอบความแตกต่างของขนาดคลังสินค้าได้ค่าสถิติ F เท่ากับ 4437129.574 และค่า $p\text{-value} < 0.001$ แสดงว่าขนาดคลังสินค้ามีผลต่อระยะทางการเดินหีบสินค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการทดสอบความแตกต่างของขนาดใบสั่งซื้อต่างกัน ได้ค่าสถิติ F เท่ากับ 5487089.837 และค่า $p\text{-value} < 0.001$ แสดงว่าขนาดใบสั่งซื้อมีผลต่อระยะทางการเดินหีบสินค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตารางที่ 2 ยังแสดงให้เห็นว่าขนาดของใบสั่งซื้อและขนาดของคลังสินค้ามีผลกระทบอย่างมากต่อระยะทางการเดินหีบสินค้า โดยเฉลี่ยโดยสังเกตจากค่า Sequential sum of square (Seq. SS) ที่มีค่าสูง ผลลัพธ์นี้เป็นไปตามที่คาดไว้และสมเหตุสมผลกับความเป็นจริงที่ว่าระยะทางการเดินหีบสินค้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดของใบสั่งซื้อและขนาดของคลังสินค้า นอกจากนี้พบว่าวิธีการเก็บสินค้าในคลังสินค้ามีผลกระทบต่อระยะทางการเดินเฉลี่ยน้อยที่สุด ผล

การทดสอบผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยได้แก่ 1) วิธีการเดินหีบสินค้าและวิธีการเก็บสินค้า 2) วิธีการเดินหีบสินค้าและขนาดคลังสินค้า 3) วิธีการเดินหีบสินค้าและขนาดของใบสั่งซื้อ 4) วิธีการเก็บสินค้าและขนาดคลังสินค้า 5) วิธีการเก็บสินค้าและขนาดของใบสั่งซื้อ และ 6) ขนาดคลังสินค้าและขนาดของใบสั่งซื้อ ได้ค่าสถิติ F เท่ากับ 1) 4170.581, 2) 44262.040, 3) 29658.037, 4) 19623.296, 5) 15674.445 และ 6) 163565.069 ตามลำดับ และค่า $p\text{-value} < 0.001$ สำหรับทุกการทดสอบ แสดงว่าปัจจัยร่วม 2 ปัจจัยข้างต้นมีผลต่อระยะทางการเดินหีบสินค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการทดสอบผลกระทบร่วมระหว่าง 3 ปัจจัยได้แก่ 1) วิธีการเดินหีบสินค้า วิธีการเก็บสินค้า และขนาดคลังสินค้า 2) วิธีการเดินหีบสินค้า วิธีการเก็บสินค้า และขนาดของใบสั่งซื้อ 3) วิธีการเดินหีบสินค้า ขนาดคลังสินค้า และขนาดของใบสั่งซื้อ และ 4) วิธีการเก็บสินค้า ขนาดคลังสินค้า และขนาดของใบสั่งซื้อ ได้ค่าสถิติ F เท่ากับ 1) 61.022, 2) 1183.454, 3) 2272.331, และ 4) 1138.894 ตามลำดับ และค่า $p\text{-value} < 0.001$ สำหรับทุกการทดสอบ แสดงว่าปัจจัยร่วม 3 ปัจจัยข้างต้นมีผลต่อระยะทางการเดินหีบสินค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการทดสอบผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยทั้ง 4 ซึ่งประกอบด้วย วิธีการเดินหีบสินค้า วิธีการเก็บสินค้า ขนาดคลังสินค้า และขนาดของใบสั่งซื้อ ได้ค่าสถิติ F เท่ากับ 21.928 และค่า $p\text{-value} < 0.001$ แสดงว่าปัจจัยทั้ง 4 มีผลกระทบร่วมกันต่อระยะทางการเดินหีบสินค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R Squared) ของตัวแบบมีค่าเท่ากับ 0.9999 หมายความว่าตัวแบบนี้สามารถอธิบายความผันแปรของข้อมูลได้

99.99% ซึ่งเป็นตัวเลขที่สูง แสดงให้เห็นว่าตัวแบบมีความเหมาะสมในการประมาณค่าระยะทางการเดินเฉลี่ยของพนักงานหยิบสินค้าในคลังสินค้า

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ของการทดสอบ ANOVA สำหรับระยะทางการเดินเฉลี่ย

source	df	Seq. SS	Adj. MS	F	p-value
Corrected Model	107	31936921.634 ^a	298475.903	252646.028	<0.001
Intercept	1	273126002.713	273126002.713	231188511.329	<0.001
routing	2	3813398.092	1906699.046	1613932.433	< 0.001
storage	3	3216673.823	1072224.608	907588.470	< 0.001
warehouse sizes	2	10484045.743	5242022.872	4437129.574	< 0.001
pick-list sizes	2	12964890.903	6482445.452	5487089.837	< 0.001
routing * storage	6	29562.739	4927.123	4170.581	< 0.001
routing * warehouse sizes	4	209164.615	52291.154	44262.040	< 0.001
routing * pick-list sizes	4	140151.968	35037.992	29658.037	< 0.001
storage * warehouse sizes	6	139097.718	23182.953	19623.296	< 0.001
storage * pick-list sizes	6	111106.696	18517.783	15674.445	< 0.001
warehouse sizes * pick-list sizes	4	772942.795	193235.699	163565.069	< 0.001
routing * storage * warehouse sizes	12	865.096	72.091	61.022	< 0.001
routing * storage * pick-list sizes	12	16777.591	1398.133	1183.454	< 0.001
routing * warehouse sizes * pick-list sizes	8	21476.243	2684.530	2272.331	< 0.001
storage * warehouse sizes * pick-list sizes	12	16145.866	1345.489	1138.894	< 0.001
routing * storage * warehouse sizes * pick-list sizes	24	621.744	25.906	21.928	< 0.001
Error	3132	3700.143	1.181		
Total	3240	305066624.490			
Corrected Total	3239	31940621.777			

a. R Squared = 0.9999 (Adjusted R Squared = 0.9999)

เมื่อพิจารณาวิธีการเดินหิบบินค้ำแบบ E, LS และ LL ในคลังสินค้าขนาด WZ1, WZ2 และ WZ3 จากตารางที่ 3 พบว่าวิธีการเดินหิบบินค้ำแบบ E เป็นวิธีที่ให้ระยะทางการเดินเฉลี่ยน้อยที่สุดในทุก ๆ ขนาดคลังสินค้า โดยสามารถลดระยะทางการเดินเฉลี่ยได้ประมาณ 18-36% เมื่อเทียบกับวิธีการเดินหิบบินค้ำแบบ LS และ LL อย่างไรก็ตามวิธีการเดินหิบบินค้ำแบบฮิวริสติกส์ได้รับความนิยมในทางอุตสาหกรรมมากกว่าวิธีการเดินหิบบินค้ำแบบ E เนื่องจากความง่ายต่อการนำไปใช้ จากผลการทดลองพบว่า ร้อยละความแตกต่างของระยะทางของวิธีการเดินหิบบินค้ำแบบ LS เมื่อเทียบกับวิธีการเดินหิบบินค้ำแบบ E มีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของคลังสินค้า เพราะความยาวของทางเดินเพิ่มขึ้นประกอบกับลักษณะการเดินหิบบินค้ำแบบ LS ที่เมื่อเดินเข้าทางใดทางหนึ่งแล้วต้องเดินไปให้สุดทางเดินถึงจะเปลี่ยนไปทางเดินอื่นได้ ต่างจากการเดินหิบบินค้ำแบบ LL ที่ค่าร้อยละความแตกต่างดังกล่าวมีค่าลดลงเมื่อคลังสินค้ามีขนาดใหญ่ขึ้น เพราะการเดินหิบบินค้ำแบบ LL ไม่จำเป็นต้องเดินให้สุดทางเดินหนึ่ง ๆ แต่สามารถเดินไปจนถึงตำแหน่งที่เก็บสินค้าแล้วเดินออกมาตามทางเข้าเดิมทำให้สามารถลดระยะทางในการเดินได้ ดังนั้นการเดินหิบบินค้ำแบบ LS จึงมีประสิทธิภาพสูงกว่าการเดินหิบบินค้ำแบบ LL ในคลังสินค้าขนาดเล็ก ส่วนการเดินหิบบินค้ำแบบ LL มีแนวโน้มที่จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการเดินหิบบินค้ำแบบ LS ในคลังสินค้าขนาดใหญ่

ตารางที่ 3 ระยะทางการเดินเฉลี่ย(เมตร)เมื่อเดินหิบบินค้ำในคลังสินค้าขนาดต่าง ๆ และร้อยละที่เพิ่มของระยะทางการเดินเฉลี่ยเมื่อเทียบกับวิธีการเดินหิบบินค้ำแบบ E

วิธีการเดินหิบบินค้ำ	WZ1		WZ2		WZ3	
	ร้อยละที่เพิ่ม		ร้อยละที่เพิ่ม		ร้อยละที่เพิ่ม	
	ค่าเฉลี่ย	จากวิธีการเดิน	ค่าเฉลี่ย	จากวิธีการเดิน	ค่าเฉลี่ย	จากวิธีการเดิน
		หิบบินค้ำ แบบ E		หิบบินค้ำ แบบ E		หิบบินค้ำ แบบ E
E	187.159	-	243.805	-	301.141	-
LS	220.847	18.00	299.303	22.76	382.714	27.09
LL	255.152	36.33	325.655	33.57	397.297	31.93

เมื่อพิจารณาวิธีการเดินหิบบินค้ำแบบ E, LS และ LL เมื่อขนาดใบสั่งซื้อเป็น 10, 20 และ 30 ในตารางที่ 4 พบว่าวิธีการเดินหิบบินค้ำแบบ E เป็นวิธีที่ให้ระยะทางการเดินเฉลี่ยน้อยที่สุดและมีระยะทางการเดินเฉลี่ยน้อยกว่าการเดินแบบฮิวริสติกส์อยู่ประมาณ 22-36% ในทุก ๆ ขนาดใบสั่งซื้อ ส่วนวิธีการเดินแบบฮิวริสติกส์พบว่าวิธีการเดินหิบบินค้ำแบบ LS และ LL มีค่าของร้อยละความแตกต่างจากวิธีการเดินหิบบินค้ำแบบ E ประมาณ 22-25%

และ 31-36% ตามลำดับ เห็นได้ว่าการเดินหิบบินค้ำแบบ LS มีประสิทธิภาพสูงกว่าการเดินหิบบินค้ำแบบ LL ในทุกขนาดของใบสั่งซื้อ

ตารางที่ 4 ระยะทางการเดินเฉลี่ย(เมตร)เมื่อใบสั่งซื้อมีขนาดต่าง ๆ และร้อยละที่เพิ่มของระยะทางการเดินเฉลี่ยเมื่อเทียบกับวิธีการเดินหิบบินค้ำแบบ E

ขนาดใบสั่งซื้อ	10		20		30	
วิธีการเดิน หิบบินค้ำ	ค่าเฉลี่ย	ร้อยละที่เพิ่ม	ค่าเฉลี่ย	ร้อยละที่เพิ่ม	ค่าเฉลี่ย	ร้อยละที่เพิ่ม
		จากวิธีการเดิน หิบบินค้ำ		จากวิธีการเดิน หิบบินค้ำ		จากวิธีการเดิน หิบบินค้ำ
		แบบ E		แบบ E		แบบ E
E	173.878	-	252.627	-	305.600	-
LS	212.437	22.18	315.488	24.88	374.939	22.69
LL	236.331	35.92	339.053	34.21	402.719	31.78

ตารางที่ 5 ระยะทางการเดินเฉลี่ย(เมตร)ภายใต้วิธีการเก็บสินค้าที่แตกต่างกัน

วิธีการเดินหิบบินค้ำ					
E		LS		LL	
วิธีการเก็บสินค้า	ค่าเฉลี่ย	วิธีการเก็บสินค้า	ค่าเฉลี่ย	วิธีการเก็บสินค้า	ค่าเฉลี่ย
TB3	199.244	TB3	253.381	TB3	274.088
TB2	238.479	TB2	290.896	TB2	320.819
TB1	264.213	TB1	318.754	TB1	350.070
R	274.204	R	340.788	R	359.161

จากตารางที่ 2 พบว่าวิธีการเดินหิบบินค้ำกับวิธีการเก็บสินค้ามีผลกระทบร่วมกันต่อระยะทางการเดินหิบบินค้ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่าการเก็บสินค้าแบบ TB1-TB3 สามารถลดระยะทางการเดินในคลังสินค้าได้เมื่อเทียบกับการเก็บสินค้าแบบ R ไม่ว่าจะเลือกวิธีการเดินหิบบินค้ำแบบ E, LS หรือ LL โดยการเดินหิบบินค้ำแบบ E กับการเก็บสินค้าแบบ TB3 ให้ผลลัพธ์ระยะทางการเดินเฉลี่ยน้อยที่สุด กรณีการเดินหิบบินค้ำแบบฮิวริสติกส์พบว่าการเดินหิบบินค้ำแบบ LS ให้ระยะทางการเดินหิบบินค้ำน้อยกว่าการเดินหิบบินค้ำแบบ LL ไม่เพียงแต่การเก็บสินค้าแบบ TB3 เท่านั้น แต่รวมถึงการเก็บสินค้าแบบ TB2, TB1 และ R ด้วย

วิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิจัยพบว่าวิธีการเดินหีบสินค้า วิธีการเก็บสินค้า ขนาดของคลังสินค้า และขนาดของใบสั่งซื้อ มีผลกระทบร่วมกันต่อระยะทางการเดินหีบสินค้า อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการประยุกต์ใช้วิธีการเดินหีบสินค้าแบบวิธีแมนตรงและการเก็บตามการหมุนเวียนที่มีความเบ้ของความต้องการแบบ 20/80 เป็นวิธีที่ให้ระยะทางการเดินสั้นที่สุด อย่างไรก็ตาม การเดินหีบสินค้าแบบวิธีแมนตรงมีรูปแบบการเดินที่ไม่แน่นอนและซับซ้อน ดังนั้นคลังสินค้าที่จะประยุกต์ใช้วิธีนี้ควรเป็นคลังสินค้าที่มีการนำเทคโนโลยีที่ทันสมัย มาช่วยแสดงเส้นทางการเดินให้กับพนักงานหีบสินค้า โดยอาจจะเป็นการแสดงเส้นทางเดินบนแท็บเล็ตหรือเครื่องมือช่วยหีบสินค้าอื่น ๆ สำหรับคลังสินค้าที่จะประยุกต์ใช้การเดินหีบสินค้าแบบอีวีรสถิตส์ คลังสินค้าควรเลือกการเดินหีบสินค้าแบบ Leaf S-shape เพราะจากผลการวิจัยพบว่าวิธีการเดินหีบสินค้าแบบ Leaf S-shape มีประสิทธิภาพสูงกว่า Leaf Largest gap ประกอบกับรูปแบบการเดินหีบสินค้าแบบ Leaf S-shape ง่ายต่อการจดจำของพนักงานหีบสินค้า

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย วิธีการเดินหีบสินค้า วิธีการเก็บสินค้า ขนาดของคลังสินค้า และขนาดใบสั่งซื้อ ต่อระยะทางการเดินหีบสินค้าของพนักงานหีบสินค้าในคลังสินค้านำไปไม่ โดยวิธีการเดินหีบสินค้าผู้วิจัยพิจารณา 3 ระดับ ได้แก่ วิธีแมนตรง วิธีอีวีรสถิตส์แบบ Leaf S-shape และ วิธีอีวีรสถิตส์แบบ Leaf Largest gap วิธีการเก็บสินค้าในคลังสินค้าพิจารณา 4 ระดับ ได้แก่ การเก็บแบบสุ่ม การเก็บตามการหมุนเวียนที่มีความเบ้ของความต้องการแบบ 20/40, 20/60 และ 20/80 ขนาดคลังสินค้าประกอบด้วย 3 ระดับ ได้แก่ คลังสินค้านำไปไม่ที่มีจำนวนทางเดินหีบสินค้าเท่ากับ 21, 27 และ 33 ทางเดิน และสุดท้ายคือขนาดของใบสั่งซื้อซึ่งพิจารณา 3 ระดับ ได้แก่ ขนาด 10, 20 และ 30 รายการ ผลจาก ANOVA สรุปได้ว่าปัจจัยหลักทุก ๆ ปัจจัย ซึ่งประกอบด้วย วิธีการเดินหีบสินค้า วิธีการเก็บสินค้า ขนาดคลังสินค้า และขนาดของใบสั่งซื้อ มีผลกระทบต่อระยะทางการเดินหีบสินค้าในคลังสินค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 นอกจากนี้ ปัจจัยร่วม 2 3 และ 4 ปัจจัยก็มีผลกระทบร่วมกันต่อระยะทางการเดินหีบสินค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นกัน งานวิจัยนี้สามารถต่อยอดโดยการพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น การจัดกลุ่มใบสั่งซื้อ (order batching) หรือการพิจารณารูปแบบวิธีการเดินหีบสินค้าและการเก็บสินค้าแบบอื่น ๆ นอกจากนี้ยังสามารถขยายงานวิจัยนี้ไปยังคลังสินค้านำไปแบบที่แตกต่างออกไป เช่น คลังสินค้าแบบเชฟรอน (chevron warehouse) และแบบก้างปลา (fishbone warehouse) เป็นต้น

- Bender, P. S. (1981). Mathematical modeling of the 20/80 rule: theory and practice. *Journal of Business Logistics*, 2(2), 139-157.
- Bukchin, Y., Khmelnitsky, E., & Yakuel, P. (2012). Optimizing a dynamic order-picking process. *European Journal of Operational Research*, 219(2), 335-346.
- Çelik, M., & Süral, H. (2014). Order picking under random and turnover-based storage policies in fishbone aisle warehouses. *IIE Transactions*, 46(3), 283-300.
- Chan, F. T., & Chan, H. K. (2011). Improving the productivity of order picking of a manual-pick and multi-level rack distribution warehouse through the implementation of class-based storage. *Expert systems with applications*, 38(3), 2686-2700.
- De Koster, R., Le-Duc, T., & Roodbergen, K. J. (2007). Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 182(2), 481-501.
- Grosse, E. H., Glock, C. H., & Neumann, W. P. (2017). Human factors in order picking: a content analysis of the literature. *International Journal of Production Research*, 55(5), 1260-1276.
- Manzini, R., Gamberi, M., Persona, A., & Regattieri, A. (2007). Design of a class based storage picker to product order picking system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(7-8), 811-821.
- Masae, M., Glock, C. H., & Grosse, E. H. (2020a). Order picker routing in warehouses: A systematic literature review. *International Journal of Production Economics*, 224, 107564.
- Masae, M., Glock, C. H., & Vichitkunakorn, P. (2020b). Optimal picker routing in a conventional warehouse with two blocks and arbitrary starting and ending points of a tour. *International Journal of Production Research*, 58(17), 5337-5358.
- Masae, M., Glock, C. H., & Vichitkunakorn, P. (2020c). Optimal order picker routing in the chevron warehouse. *IIE Transactions*, 52(6), 665-687.
- Masae, M., Glock, C. H., & Vichitkunakorn, P. (2021). A method for efficiently routing order pickers in the leaf Warehouse. *International Journal of Production Economics*. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108069>
- Öztürkoglu, Ö., Gue, K. R., & Meller, R. D. (2012). Optimal unit-load warehouse designs for single-command operations. *IIE Transactions*, 44(6), 459-475.
- Pansart, L., Catusse, N., & Cambazard, H. (2018). Exact algorithms for the order picking problem. *Computers & Operations Research*, 100, 117-127.

- Petersen, C. G., Aase, G. R., & Heiser, D. R. (2004). Improving order-picking performance through the implementation of class-based storage. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 34(7), 534-544.
- Pohl, L. M., Meller, R. D., & Gue, K. R. (2009). Optimizing fishbone aisles for dual-command operations in a warehouse. *Naval Research Logistics (NRL)*, 56(5), 389-403.
- Ratliff, H. D., & Rosenthal, A. S. (1983). Order-picking in a rectangular warehouse: a solvable case of the traveling salesman problem. *Operations Research*, 31(3), 507-521.
- Roodbergen, K. J., & De Koster, R. (2001). Routing order pickers in a warehouse with a middle aisle. *European Journal of Operational Research*, 133(1), 32-43.
- Theys, C., Bräysy, O., Dullaert, W., & Raa, B. (2010). Using a TSP heuristic for routing order pickers in warehouses. *European Journal of Operational Research*, 200(3), 755-763.
- Won, J., & Olafsson, S. (2005). Joint order batching and order picking in warehouse operations. *International Journal of Production Research*, 43(7), 1427-1442.