

แบบจำลองสมการโครงสร้างเพื่อการทำนาย

รุ่งโรจน์ สงสระบุญ¹

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอองค์ความรู้การวิเคราะห์สมการโครงสร้างเพื่อการทำนาย ด้วยข้อมูลของตัวแปรสังเกตได้หลายๆ ตัวแปร ที่สามารถทำนายที่ส่งผลหรือมีอิทธิพลต่อตัวแปรแฝง (latent variable) ที่ตัวแปรแฝงนั้นวัดได้จากตัวบ่งชี้ได้หลายตัวแปร ขั้นตอนการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้าง (Structural Equation Modeling: SEM) ที่เริ่มด้วยการนำข้อมูลจากโปรแกรม Statistical Package for the Social Science for Windows (SPSS) และทำการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้าง (Structural Equation Modeling: SEM) ด้วยโปรแกรม LISREL หรือ Analysis of Moment Structure: AMOS ที่ต้องมีขั้นตอนสำคัญ ได้แก่ การเตรียมข้อมูลดิบ การระบุโมเดลหรือวาดภาพโมเดลจากการวิจัย การกำหนดการแสดงผลการวิเคราะห์ การวิเคราะห์โมเดล และการปรับโมเดล โดยค่าสถิติที่ได้จากการแสดงผลของตัวแปรสังเกตได้ที่มีผลต่อตัวแปรแฝง (latent variable)

คำสำคัญ : 1. แบบจำลอง 2. สมการโครงสร้าง 3. การทำนาย

¹ อาจารย์ ดร. ประจำหลักสูตร คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยสยาม อีเมล : rrs101@hotmail.com

Structural equation modeling for prediction

Rungroje Songsraboon²

Abstract

The objective of this article was to present the structural equation modeling for prediction based on observable variables which can predict or have effects on latent variables. The analysis of the structural equation modeling (SEM) starts from retrieving data from statistical package for the social science for Windows (SPSS), analyzing the structural equation modeling (SEM) using LISREL or Analysis of Moment Structure (AMOS). The necessary steps include preparing raw data, constructing a model or picturing a model based on research, deciding model presentation, analyzing the model, and adjusting the model based on the statistics of observable variables which have effects on latent variables.

Keywords: 1. Model 2. Structure equation 3. Prediction

² Lecturer, D.B.A. at Faculty of Business Administration, Siam University, Bangkok, Thailand. Email address: rrs101@hotmail.com

บทนำ

การวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้าง (Structural Equation Modeling: SEM) เป็นวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติที่ใช้ทดสอบชุดตัวแปรที่ศึกษา ในงานวิจัยมีโครงสร้างความสัมพันธ์เชิงสาเหตุที่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในแบบจำลองสมมติฐานหรือไม่ ปัจจุบันมีการทำวิจัยกันมากขึ้นในทุกสาขา และยิ่งนาน งานวิจัยจะมีตัวแปรหรือปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากในทุกสาขา ไม่ว่าจะเป็นงานวิจัยด้านสังคมศาสตร์ การตลาด การเงิน เป็นต้น ทำให้การนำเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลหลายตัวแปรมาใช้ในการทำวิจัยเชิงปริมาณกันมากขึ้น

การวิเคราะห์ข้อมูลหลายตัวแปรมาใช้วิเคราะห์ปัญหาที่มีตัวแปรหลายๆ ตัวนั้น เพื่อให้ให้นักวิจัยสามารถตอบคำถามงานวิจัยหรือวัตถุประสงค์ของงานวิจัย และนำสถิติมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่หลักฐานที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลเพียงลำพังยังไม่สามารถยืนยันหรือให้ข้อสรุปของความสัมพันธ์เชิงสาเหตุได้อย่างหนักแน่น แบบแผนการวิจัยยังคงเป็นแบบแผนการวิจัยสำคัญที่สามารถศึกษาความสัมพันธ์เชิงสาเหตุของตัวแปรได้ชัดเจนและหนักแน่นมากที่สุด เพราะมีการควบคุมตัวแปรแทรกซ้อนต่างๆ ด้วยการจัดการกระทำทางการวิจัยที่เกิดขึ้นจริง แตกต่างจากการศึกษาความสัมพันธ์เชิงสาเหตุโดยใช้การวิเคราะห์สถิติหลายตัวแปร ซึ่งเป็นการควบคุมทางสถิติที่เป็นการสมมติตัวเลขในข้อมูลตามเงื่อนไขของตัวแปรที่ควบคุมโดยที่เงื่อนไขนั้นอาจจะไม่ได้เกิดขึ้นจริงเลยก็ตาม ตัวอย่าง เช่น ถ้าเพศเป็นตัวแปรแทรกซ้อนที่ต้องการควบคุม ถ้าใช้วิธีควบคุมตัวแปรด้วยการจัดการกระทำอย่างเช่นที่ใช้ในงานวิจัยทั่วไป วิธีหนึ่งที่ใช้ควบคุมตัวแปรแทรกซ้อนคือการทำให้ตัวแปรมีค่าคงที่ โดยพยายามหากกลุ่มตัวอย่างที่มีเพศเดียวกันมาศึกษาทั้งในกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุม แต่ถ้าใช้วิธีควบคุมทางสถิติจะเป็นการสมมติในเชิงตัวเลขว่าถ้าเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างที่มีเพศเดียวกัน ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่วิเคราะห์น่าจะเป็นอย่างไร ทั้งที่แท้จริงแล้ว ข้อมูลที่เก็บและใช้วิเคราะห์นั้นไม่ได้มาจากกลุ่มตัวอย่างที่มีเพศเดียวกันตามเงื่อนไขที่สมมติเลยก็ตาม การวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้าง เป็นการศึกษาความสัมพันธ์เชิงสาเหตุที่มีประสิทธิภาพ และมีการสร้างความแข็งแกร่งให้กับงานวิจัย ทั้งในแง่ของความเที่ยงตรงภายใน (internal validity) ที่จะได้จากแบบแผนการวิจัย และความเที่ยงตรงในการสรุปผลทางสถิติ (statistical conclusion validity) ที่จะได้จากการใช้วิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้าง ซึ่งเป็นสถิติที่มีอำนาจทดสอบ (power) สูงในกรณีที่มีหลายตัวแปร (Tenko & Marcoulides, 2006)

ปัจจุบันมีการนำเทคนิคการวิเคราะห์หลายตัวแปรมาใช้ในการวิจัยอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็น Multiple Regression Analysis, Logistic Regression Analysis, Cluster Analysis, Factor Analysis, Discriminant Analysis เป็นต้น (Mulaik & Millsap, 2000)

โดยเทคนิคที่กล่าวมาถือว่าเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพมาก แต่ยังมีข้อเสีย คือ เทคนิคดังกล่าวสามารถตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงสาเหตุได้ครั้งละ 1 ความสัมพันธ์เท่านั้น หรือมีตัวแปรตามได้เพียงครั้งละ 1 ตัวแปรเท่านั้น ถึงแม้จะมีเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ตัวแปรตามได้ครั้งละหลายๆ ตัวแปร เช่น MANOVA, Canonical Correlation แต่ทั้ง 2 เทคนิคดังกล่าวจะสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสาเหตุระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามได้ครั้งละ 1 ความสัมพันธ์เท่านั้น แต่ในขณะที่การวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้าง สามารถตรวจสอบความสัมพันธ์ได้หลายๆ สมการในเวลาเดียวกัน และตัวแปรบางตัวในสมการโครงสร้าง สามารถเป็นได้ทั้งตัวแปรต้นและตัวแปรตาม นอกจากนั้นการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้าง ยังสามารถใช้วิเคราะห์ได้ทั้งตัวแปรสังเกตได้และตัวแปรแฝง ซึ่งเทคนิคอื่นๆ ข้างต้นสามารถวิเคราะห์ได้เฉพาะตัวแปรสังเกตได้เท่านั้น

การทบทวนวรรณกรรม (Literature review)

Vanitbuncha (2015) ได้กล่าวถึง “การทบทวนวรรณกรรม” ว่าเป็นสิ่งสำคัญในลำดับต้นๆ ในการทำวิจัยของทุกระดับชั้น ตั้งแต่การวิจัยพื้นฐาน (basic research) การวิจัยเชิงประยุกต์ (apply research) จนถึงการวิจัยเชิงทดลอง (experimental research) โดยการทบทวนวรรณกรรม หมายถึง แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการวิจัย ที่ผู้วิจัยสนใจที่จะหาคำตอบ การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสามารถศึกษาได้ ทั้งในชั้นปฐมภูมิ (first data) และชั้นทุติยภูมิ (secondary) ที่เป็นข้อมูลที่มีความสำคัญในการนำปัจจัยต่างๆ มาใช้ในงานวิจัย โดยมีหลักการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องและขั้นตอนการทบทวนเอกสารและวรรณกรรม ประกอบไปด้วย การวิเคราะห์และการระบุปัญหาการวิจัย การค้นหาคำสำคัญ (keywords) การทบทวนจากเอกสารหลักฐานต่างแหล่งข้อมูลต่างๆ จากประสบการณ์ของผู้วิจัยพบว่า การกำหนดคำสำคัญของตัวแปรตาม (keywords) เป็นตัวใดตัวหนึ่งก่อน และเริ่มทำการค้นหาว่าตัวแปรต้นเหตุอะไรที่ส่งผลหรือมีผลต่อตัวแปรตามที่กำหนดไว้ จากนั้นนำตัวแปรต้นเหตุที่ค้นพบมาทำการสังเคราะห์ให้ได้ผลตรงกับวัตถุประสงค์ที่กำลังต้องการศึกษาอยู่โดยทำการเขียนเป็นกรอบแนวคิดเบื้องต้น เพื่อที่จะได้ทำการศึกษาในรูปแบบของแบบจำลองสมการโครงสร้างต่อไป

แบบจำลองสมการโครงสร้าง (Structural Equation Modeling: SEM)

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่ใช้การยืนยันสมมติฐานในงานวิจัยที่ได้จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง หรือเนื้อหาทางทฤษฎีในรูปแบบเชิงสาเหตุ ประกอบด้วยอิทธิพล

ทางตรง (Direct Effect: DE) และทางอ้อม (Indirect Effect: IE) โดยสามารถแปลงสมมติฐานงานวิจัยในรูปโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเทคนิคที่แสดงความสัมพันธ์ที่คาดไว้ตามทฤษฎีของกลุ่มตัวแปร ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวในลักษณะของรูปไดอะแกรมหรือที่เรียกว่าแผนภาพเส้นทาง (path diagram)

การทดสอบสมมติฐานที่เขียนขึ้นในเชิงทฤษฎีที่กำหนดขึ้นนั้น จะประกอบด้วยตัวแปรต้นและตัวแปรตาม โดยตัวแปรนั้นไม่เป็นอิสระจากกัน ต่างมีความสัมพันธ์ร่วมกันไม่มากนัก และทฤษฎีกำหนดไว้เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์เชิงสาเหตุเพื่ออธิบายถึงผลลัพธ์ทางตรง และผลกระทบทางอ้อม ซึ่งมีการวิเคราะห์ที่มีการควบคุมค่าความแปรปรวนระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามในกระบวนการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งในเชิงทฤษฎี โดยสามารถประยุกต์วิธีการวิเคราะห์ต่างๆ เข้าด้วยกัน ได้แก่ (1) การวิเคราะห์เส้นทางความสัมพันธ์เชิงสาเหตุระหว่างตัวแปร (path analysis) (2) การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis: CFA) (3) การจำลองสาเหตุเกี่ยวกับตัวแปรแฝง (causal modeling with latent variable) (4) การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของความแปรปรวน (even analysis of variance) (5) การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปร (multiple linear regression analysis) (Marcoulides & Schumacker, 2001)

ตัวแบบสมการโครงสร้างในรูปทั่วไปคือเมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์เชิงสาเหตุในงานวิจัยจะพบความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกันและมีความซับซ้อน ทำให้การสร้างตัวแบบเชิงสาเหตุนำสู่การสร้างตัวแบบสมการโครงสร้าง รูปแบบสมการคือการวิเคราะห์ข้อมูลจะต้องเป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้น ซึ่งข้อตกลงเบื้องต้นของ แบบจำลองสมการโครงสร้างจะมีความยืดหยุ่นมากกว่าข้อตกลงของสมการเชิงเส้นต่างๆ ไป ได้แก่ (1) ตัวแปรอิสระซึ่งเป็นตัวแปรแฝงภายนอก (exogenous) และตัวแปรแฝงภายใน (endogenous) และตัวแปรตาม ไม่จำเป็นต้องมีการแจกแจงแบบปกติ (2) ค่าความคลาดเคลื่อนต้องเป็นการแจกแจงแบบปกติ (3) ค่าความคลาดเคลื่อนของตัวแปรภายนอกแต่ละตัวต้องเป็นอิสระกัน (4) ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งหมดในตัวแบบเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น (linear) แบบบวก (additive) และเป็นความสัมพันธ์เชิงสาเหตุ (5) มีความสอดคล้องกันหรือความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปร ถ้าตัวแปรภายนอกหรือตัวแปรภายในไม่สอดคล้องกันแล้ว จะสังเกตได้ว่าตัวแปรที่แฝงอยู่มีความสอดคล้องกันหรือไม่ ถ้าสอดคล้องกันก็สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ และถ้าตัวแปรตามไม่มีความสอดคล้องกันแล้ว ตัวแบบสมการโครงสร้างจะไม่สามารถนำมาคำนวณได้ (6) ขนาดของกลุ่มตัวอย่างจะต้องมีอย่างน้อย 100 (น้อยที่สุด) แต่จากหนังสือเรื่อง A Beginner's Guide to Structural Equation Modeling ของ Schumacher & Lomax (2010)

กล่าวไว้ว่า จำนวนกลุ่มตัวอย่างขั้นต่ำตามเกณฑ์ของการวิเคราะห์สมการโครงสร้างสามารถคำนวณได้จากการนำตัวแปรสังเกตได้ในกรอบแนวคิดทั้งหมดคูณด้วย 5 - 20 เท่า ตัวแบบสมการโครงสร้างในรูปทั่วไป คือ

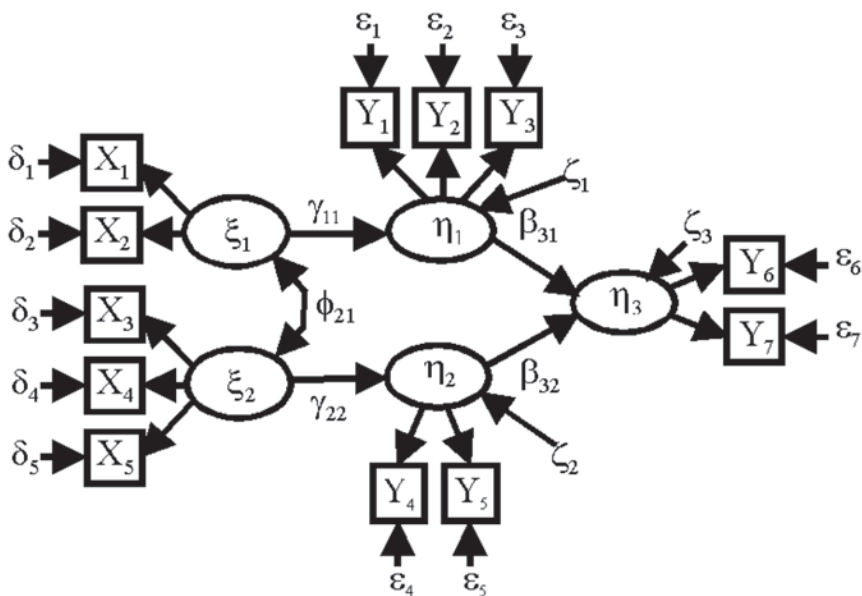
$$y = i + Xb + e$$

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์เชิงสาเหตุในงานวิจัยจะพบความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกันและมีความซับซ้อน ทำให้การสร้างตัวแบบเชิงสาเหตุไปสู่การสร้างตัวแบบสมการโครงสร้าง รูปแบบสมการคือ

$$\eta = B\eta + \Gamma\zeta + \zeta$$

ขั้นตอนการดำเนินงานของการวิเคราะห์สมการโครงสร้าง (structural equation analysis) มีขั้นตอน คือ การสร้างตัวแบบเชิงสาเหตุตามสมมติฐาน สร้างเครื่องมือและเก็บรวบรวมข้อมูลการวิเคราะห์เส้นทางความสัมพันธ์เชิงสาเหตุระหว่างตัวแปรที่ประกอบด้วยการวิเคราะห์ตัวแบบเชิงสาเหตุแบบเต็มรูป วิเคราะห์ตัวแบบเชิงสาเหตุตามสมมติฐาน การทดสอบตัวแบบเชิงสาเหตุตามสมมติฐาน และการคำนวณผลทางตรง ผลทางอ้อมและผลรวม และสุดท้ายคือการสรุปผลเชิงสาเหตุของตัวแปรอิสระที่มีต่อตัวแปรตาม

เมื่อสามารถวิเคราะห์และสร้างตัวแบบ เพื่อตอบคำถามงานวิจัยได้แล้วนั้น การสร้างแผนภาพของแบบจำลองสมการโครงสร้างโดยจึงได้มีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้กับการสร้าง มีดังนี้ โปรแกรม EQS พัฒนาโดย P.M. Bentler ในปี ค.ศ.1980, โปรแกรม LISCOMP พัฒนาโดย B. Muthen ในปี ค.ศ.1987, โปรแกรม LINCIS พัฒนาโดย R. Schoenberg และ G. Arminger ในปี ค.ศ.1988, โปรแกรม EzPATH พัฒนาโดย J.H. Steiger ในปี ค.ศ.1989, โปรแกรม Analysis of Moment Structure: AMOS พัฒนาโดย J. Arbuckle และโปรแกรม PROCCALIS พัฒนาโดย SAS Institute ในปี ค.ศ.1990 (Vanitbuncha, 2015) ซึ่งโปรแกรมเหล่านี้ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อช่วยสร้างตัวแบบการวิจัยแบบจำลองสมการโครงสร้าง การวาดแบบตัวอย่างโดยใช้กราฟฟิกจากโปรแกรม Analysis of Moment Structure: AMOS เพื่อให้เห็นแผนภูมิเส้นทางความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ได้อย่างชัดเจนขึ้นมากกว่าการเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ ดังตัวอย่างแผนภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 1 การแสดงแผนภูมิเส้นทางความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร
ที่มา: Schumacker & Lomax (2010)

ความหมายต่างๆ ของสัญลักษณ์ในแผนภูมิเส้นทางความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในภาพที่ 1 ดังนี้

1) ตัวแปรแฝง (Latent Constructs) มีลักษณะการวัดที่เป็นนามธรรม เช่น เชาวน์ปัญญาหรือเจตคติที่สังเกตจากพฤติกรรม แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ตัวแปรแฝงภายใน (Exogenous; $\eta = \text{eta}$) เป็นตัวแปรตามในสมการเดียว และตัวแปรแฝงภายนอก (Endogenous; $\zeta = \text{ksi}$) เป็นตัวแปรอิสระในทุกสมการ ตัวแปรแฝงภายในแต่ละตัวจะตกเป็นเป้าของตัวลูกศรอย่างน้อย 1 ด้าน ขณะที่ตัวแปรแฝงภายนอกเป็นต้นกำเนิดลูกศรทั้ง 2 ด้าน

2) ลูกศรหัวเดียวแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงสาเหตุ (ผลกระทบทางตรงข้ามของตัวแปรหนึ่งมีผลต่อตัวแปรหนึ่ง และลูกศรสองหัวแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงสหสัมพันธ์

3) พารามิเตอร์ที่นำเสนอสหสัมพันธ์ของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแฝงได้แก่

3.1 ค่า gamma (γ): สำหรับการถดถอยของตัวแปรแฝงภายในบนตัวแปรแฝงภายนอก

3.2 ค่า beta (β): การถดถอยของตัวแปรแฝงภายในตัวหนึ่งบนตัวแปรแฝงภายในอีกตัวหนึ่ง

3.3 ค่า phi (φ): สำหรับความแปรปรวนจากตัวทำนายร่วมกันของตัวแปรแฝงภายนอกที่อยู่นอกตัวแบบที่พิจารณาระหว่างตัวแปรแฝงภายนอก

3.4 ค่า zeta (ζ): ความคลาดเคลื่อนของโครงสร้าง

3.5 ค่า psi (ψ): พารามิเตอร์ของความแปรปรวนร่วมระหว่างความคลาดเคลื่อน

3.6 ค่า lambda (λ): ค่าน้ำหนักที่เชื่อมโยงโครงสร้างการวัดเมตริกซ์ lambda มี 2 ชุด โดยอยู่ด้านตัวแปร x 1 ชุด แล้วด้านตัวแปร y อีก 1 ชุด

3.7 ค่า epsilon (ϵ): ความคลาดเคลื่อนในการวัดที่สัมพันธ์กับการวัด y, ค่า delta (δ): ความคลาดเคลื่อนในการวัดที่สัมพันธ์กับการวัด x

3.8 ค่า B: อิทธิพลทางตรงของตัวแปร η บนตัวแปร η อื่นๆ

3.9 ค่า Γ : อิทธิพลทางตรงของตัวแปร ζ บนตัวแปร η

3.10 ค่า x: ตัวแปรที่สังเกตได้ที่เป็นตัวแปรอิสระ (ตัวบ่งชี้)

3.11 ค่า y: ตัวแปรที่สังเกตได้ที่เป็นตัวแปรตาม (ตัวบ่งชี้)

4) สัมประสิทธิ์บนลูกศร: ในสัมประสิทธิ์จะมีตัวห้อย 2 ตัว ได้แก่ ลูกศรทางเดียว ตัวแรกเป็นตัวแปรเป้าหมายของลูกศร และตัวที่สองเป็นตัวแปรต้นกำเนิดของลูกศร, ลูกศรสองทางตัวห้อย 2 ตัวสลบที่กันได้ และลูกศรไม่มีสัมประสิทธิ์ ถือว่ามีค่าสัมประสิทธิ์ เป็น 1

โปรแกรม Analysis of Moment Structure: AMOS

การนำโปรแกรม Analysis of Moment Structure: AMOS มาช่วยแก้ปัญหาในการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างที่มีจุดเด่นอยู่ 5 ประการ คือ

1) พื้นฐานในการวิเคราะห์ข้อมูลและการประมาณค่าพารามิเตอร์ โดยใช้ทฤษฎีทางสถิติวิธี Maximum Likelihood Statistical Method: ML เพื่อแก้ปัญหาข้อดกของเบื้องต้นในส่วนของลักษณะการแจกแจงของตัวแปร และค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า

2) ลักษณะของตัวแบบ มี 2 ลักษณะ คือ ตัวแบบการวัด เพื่อแก้ปัญหาความคลาดเคลื่อนในการวัด โดยใช้หลักการวิเคราะห์องค์ประกอบเพื่อยืนยัน หรือการวิเคราะห์ยืนยันองค์ประกอบในการประมาณค่าตัวแปรแฝงตามตัวแบบความสัมพันธ์โครงสร้างเชิงเส้นระหว่างตัวแปรที่สังเกตได้กับตัวแปรแฝง แล้วใช้ตัวแปรแฝงไปวิเคราะห์ข้อมูล และตัวแบบสมการโครงสร้างจะครอบคลุมลักษณะความสัมพันธ์โครงสร้างเชิงเส้นทุกรูปแบบ จึงสามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้ไม่ว่าเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสาเหตุ

ตัวแบบแบบอิทธิพลทางเดียว หรือแบบอิทธิพลย้อนกลับ

3) สามารถปรับเปลี่ยนเส้นทางอิทธิพลในตัวแบบหรือตรวจสอบความคลาดเคลื่อนในการวัดของตัวแปร โดยการตรวจสอบความสัมพันธ์โครงสร้างระหว่างตัวแปรตามทฤษฎีได้หลายวิธี โดยใช้ไคสแควร์ (χ^2) ดัชนีวัดความพอเหมาะพอดี หรือดัชนีวัดระดับความกลมกลืน (Goodness of fit index = GFI) รากของค่าเฉลี่ยกำลังสองของเศษเหลือ (Root of mean square residuals = RMR) เป็นต้น

4) ข้อจำกัดในเรื่องข้อตกลงเบื้องต้นมีน้อยกว่าทำให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องมากกว่าการวิเคราะห์ข้อมูลแบบเดิม โดยเฉพาะข้อที่ว่าด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อน และตัวแปรที่วัดได้หรือสังเกตได้ต้องไม่มีความคลาดเคลื่อน ข้อมูลส่วนใหญ่จะไม่เป็นไปตามข้อตกลงนี้

5) การเตรียมข้อมูล การสร้างข้อมูล กระทำได้แม้ข้อมูลจะเป็นตัวแปรที่มีระดับการวัดแบบเรียงอันดับ หรือมีตัวแปรเซ็นเซอร์ทั้งบนและล่าง ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีการแจกแจงไม่เป็นแบบปกติ ข้อมูลมีความถี่มากๆ ที่ค่าใดค่าหนึ่ง

การกำหนดตัวแบบ (Model Design)

Schumacker & Lomax (2010) ได้กล่าวถึงการกำหนดตัวแปรและความสัมพันธ์ของตัวแปรให้ชัดเจน โดยตัวแปรภายนอกจะพิจารณาให้เป็นจุดเริ่มต้นของตัวแบบ ตัวแปรภายในเป็นได้ทั้งตัวแปรทำนายและตัวแปรเกณฑ์ที่ถูกทำนายด้วยตัวแปรภายนอก และตัวแปรภายในอื่นๆ ซึ่งทุกตัวแปรต้องอยู่ภายใต้ทฤษฎีในการเชื่อมโยงกัน และสามารถสร้างตัวแบบสมการเชิงสาเหตุ ซึ่งเป็นรูปแบบของเมทริกซ์จะถูกกำหนดโดยสมการ 3 รูปแบบคือ

1) **ตัวแบบสมการโครงสร้าง (Structural Equation Model)** เป็นความสัมพันธ์เชิงสาเหตุระหว่างตัวแปร โดยจะอธิบายอิทธิพลในเชิงเหตุและผล

$$\eta = B\eta + \Gamma\xi + \zeta \begin{cases} \eta_1 = \beta_{12}\eta_2 + \gamma_{11}\xi_1 + \gamma_{12}\xi_2 + \zeta_1 \\ \eta_2 = \beta_{21}\eta_1 + \gamma_{21}\xi_1 + \gamma_{22}\xi_2 + \zeta_2 \end{cases}$$

2) **ตัวแบบการวัด (Measurement Model)** เป็นตัวแปรแฝงหรือโครงสร้างสมมติฐานที่ขึ้นอยู่กับหรือถูกบ่งชี้โดยตัวแปรสังเกต ตัวแปรแฝงจะอธิบายคุณลักษณะการ

$$y = \Lambda_y\eta + \varepsilon \begin{cases} Y_1 = \lambda_{y11}\eta_1 + \varepsilon_1 & \text{วัด (ความเชื่อมั่น) ของตัวแปร} \\ Y_2 = \lambda_{y22}\eta_2 + \varepsilon_2 & \text{สังเกต} \end{cases}$$

จากตัวแบบสมการโครงสร้างและตัวแบบการวัดตั้งที่กล่าวมา นำมาสร้างเมทริกซ์เพื่อนำมาใช้ในการหาตัวแบบ โดยแบ่งเป็น 3 กลุ่มประเภทของเมทริกซ์ คือ

กลุ่มที่ 1 แทนพารามิเตอร์ รวม 8 พารามิเตอร์ (ตัวแบบใหญ่) จำแนกเป็น 2 กลุ่มย่อย คือ

1.1 พารามิเตอร์ตามเส้นทางอิทธิพลระหว่างตัวแปรในตัวแบบ ได้แก่ B, Γ และ Λ หรือ แทนสัญลักษณ์เมทริกซ์ คือ $[BE], [GA], [LX]$ และ $[LY]$ ตามลำดับ

1.2 พารามิเตอร์ของความแปรปรวน-ความแปรปรวนร่วม ระหว่างตัวแปรภายนอกแบบแฝง และระหว่างตัวแปรความคลาดเคลื่อน ได้แก่ เมทริกซ์ความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมระหว่างตัวแปรแฝงภายใน คือ PH , เมทริกซ์ความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมระหว่างตัวแปรความคลาดเคลื่อน (ตัวแปรความคลาดเคลื่อนทุกตัวไม่สัมพันธ์กัน มีค่าเป็น 0) คือ PS ซึ่งเป็นของ ζ , TD ซึ่งเป็นของ δ , และ TE ซึ่งเป็นของ ϵ

กลุ่มที่ 2 แทนค่าเวกเตอร์ตัวแปร รวม 4 เวกเตอร์ คือ η, ζ, X และ Y หรือ แทนสัญลักษณ์เมทริกซ์ คือ $[E], [K], [X]$ และ $[Y]$ ตามลำดับ

กลุ่มที่ 3 แทนค่าเวกเตอร์ความคลาดเคลื่อน 3 เวกเตอร์ คือ ζ, δ และ ϵ หรือ แทนสัญลักษณ์เมทริกซ์ คือ $[z], [d]$ และ $[e]$ ตามลำดับ

ในการวิจัยอาจจะไม่มีตัวแปรครบทุกชนิดตามตัวแบบใหญ่ อาจจะมีเพียงบางส่วนย่อยของตัวแบบใหญ่ เรียกว่าตัวแบบย่อย (sub-model) และเมทริกซ์พารามิเตอร์มีไม่ครบทั้ง 8 เมทริกซ์ก็ได้ โดยได้แบ่งเป็นตัวแบบ 3 กลุ่มย่อย คือ

กลุ่มย่อยที่ 1 ตัวแบบการวัดและตัวแบบสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน (Measurement Model and Confirmatory Factor Analysis Models) ซึ่งจะมีแต่ตัวแปรภายนอก (แฝงและสังเกตได้) จะไม่มีตัวแปรภายใน(ทั้งแฝงและสังเกตได้) ตัวแบบเขียนในรูปสมการของเมทริกซ์ตัวแปรความคลาดเคลื่อน และพารามิเตอร์ ดังนี้

$$[X] = [LX][K] + [d]$$

กลุ่มย่อยที่ 2 ตัวแบบความสัมพันธ์โครงสร้างเชิงสาเหตุ (Causal Structural Models) ทั้งแบบที่มีและไม่มี ความคลาดเคลื่อนในการวัด

1. ตัวแบบไม่มี ความคลาดเคลื่อนในการวัด จะมีแต่ตัวแปรสังเกตได้ ไม่มีตัวแปรแฝง เขียนในรูปสมการของเมทริกซ์ตัวแปรความคลาดเคลื่อน และพารามิเตอร์ ดังนี้

$$[Y] = [LY][E] + [e]$$

2. ตัวแบบมีความคลาดเคลื่อนในการวัด จะมีตัวแปรครบทุกประเภท ทั้งสมการตัวแบบโครงสร้างและสมการตัวแบบการวัดสองสมการ และมีสถานะของ เมทริกซ์ GA, BE, PS, PH, LY และ TE

กลุ่มย่อยที่ 3 ตัวแบบไม่มีตัวแปรภายนอกสังเกตได้ แต่มีตัวแปรภายนอกแฝง ตัวแปรภายในแฝง และตัวแปรภายในสังเกตได้เท่านั้น ในบางกรณีอาจไม่มีตัวแปร ภายนอกแฝง เขียนในรูปสมการของเมทริกซ์ตัวแปรความคลาดเคลื่อน และพารามิเตอร์ ดังนี้

$$[Y] = [LY][E] + [e]$$

$$[E] = [BE][E] + [GA][K] + [z]$$

มีสถานะของเมทริกซ์ GA, BE, PS, PH, LY และ TE เท่านั้น ในกรณีไม่มี ตัวแปรภายนอกแฝง มีสถานะของเมทริกซ์ BE, PS, LY และ TE เท่านั้น โดยรูปแบบ ของเมทริกซ์มีดังนี้

1. ตัวแบบสมการโครงสร้าง

$$\eta = B\eta + \Gamma\xi + \zeta$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \end{bmatrix}$$

$$[E] = [BE][E] + [GA][K] + [z]$$

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & BE(1,2) \\ BE(2,1) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} GA(1,1) & GA(1,2) \\ GA(2,1) & GA(2,2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z1 \\ z2 \end{bmatrix}$$

2. ตัวแบบการวัดสำหรับตัวแปรภายนอก

$$X = \Lambda_X \xi + \delta$$

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{X11} & 0 \\ 0 & \lambda_{X22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix}$$

หรือ

$$[X] = [LX][K] + [d]$$

$$\begin{bmatrix} X1 \\ X2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} LX(1,1) & 0 \\ 0 & LX(2,2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K1 \\ K2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d1 \\ d2 \end{bmatrix}$$

3. ตัวแบบการวัดสำหรับตัวแปรภายใน

$$Y = \Lambda_Y \eta + \varepsilon$$

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{Y11} & 0 \\ 0 & \lambda_{Y22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix}$$

หรือ

$$[Y] = [LY][E] + [e]$$

$$\begin{bmatrix} Y1 \\ Y2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} LY(1,1) & 0 \\ 0 & LY(2,2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E1 \\ E2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e1 \\ e2 \end{bmatrix}$$

โดยมีข้อมูลนำเข้าอยู่ 2 ชนิด คือ เมทริกซ์สหสัมพันธ์ และเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม
เมทริกซ์ความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วม

$$PH = \begin{bmatrix} PH(1,1) & PH(1,2) \\ PH(2,1) & PH(2,2) \end{bmatrix}, \quad PS = \begin{bmatrix} PS(1,1) & 0 \\ 0 & PS(2,2) \end{bmatrix}$$

$$TD = \begin{bmatrix} TD(1,1) & 0 \\ 0 & TD(2,2) \end{bmatrix}, \quad TE = \begin{bmatrix} TE(1,1) & 0 \\ 0 & TE(2,2) \end{bmatrix}$$

การประเมินความเหมาะสมของตัวแบบ โดยแบ่งเครื่องมือในการประเมินเป็น 3 กลุ่ม คือ การตรวจสอบการประมาณค่าพารามิเตอร์ (Examination of the solution) ได้แก่

1. ค่าพารามิเตอร์ในเมทริกซ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในตัวแบบ (มีค่าพารามิเตอร์ครบหรือไม่)

2. ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (มีค่าน้อยบ่งบอกถึง การตัดสินใจที่ดี) และ t-value (มีค่ามากกว่า 2.00 บ่งบอกถึง พารามิเตอร์นั้นมีค่าแตกต่างจากศูนย์) ซึ่งทั้ง 2 วิธีนี้ได้แสดงในวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์

3. เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของการประมาณค่าพารามิเตอร์ (ถ้ามีพารามิเตอร์ 2 ตัวหรือมากกว่า มีความสัมพันธ์กันสูง ตัวแบบและพารามิเตอร์ก็จะไม่สอดคล้องกับข้อมูล

4. สหสัมพันธ์พหุคูณกำลังสอง (โปรแกรมจะให้มาสำหรับตัวแปรสังเกตแต่ละตัว) และสัมประสิทธิ์การอธิบาย (โปรแกรมจะแสดงของกลุ่มตัวแปรในแต่ละองค์ประกอบ)

การประมาณค่าความสอดคล้องของตัวแบบ (Measures of overall fit)

Schumacker & Lomax (2010) ได้กล่าวถึงการประมาณค่าความสอดคล้องของตัวแบบ (Measures of overall fit) ไว้ในหนังสือ A beginner's guide to structural equation modeling. (3rd Edition) ดังนี้

1. ค่า χ^2 : Chi-square เป็นสถิติที่ใช้ทดสอบภายใต้สมมติฐานหลักคือ ตัวแบบมีความสอดคล้องกับข้อมูล ถ้า χ^2 มีค่ามากจนมีนัยสำคัญทางสถิติแสดงว่า ตัวแบบไม่สอดคล้องกับข้อมูล ถ้า χ^2 มีค่าน้อยจนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติแสดงว่าตัวแบบสอดคล้องกับข้อมูล

การใช้ค่า Chi-square ต้องใช้ด้วยความระมัดระวัง เพราะข้อตกลงเบื้องต้นมีอยู่ 4 ประการ คือ ตัวแปรภายนอกสังเกตได้ต้องมีการแจกแจงปกติ การวิเคราะห์ข้อมูลต้องใช้เมทริกซ์ ความแปรปรวน-ความแปรปรวนร่วมในการคำนวณ ขนาดของกลุ่มตัวอย่างต้องมีขนาดใหญ่เท่านั้น และฟังก์ชันความกลมกลืนมีค่าเป็นศูนย์จริงตามสมมติฐานที่ใช้การทดสอบ Chi-square

2. ดัชนีเปรียบเทียบตัวแบบ (Comparative Fit) เป็นดัชนีที่ใช้เปรียบเทียบตัวแบบพื้นฐาน (baseline) ซึ่งตัวแบบพื้นฐานจะถูกเรียกว่า “Null” หรือ “Independence” เป็นตัวแบบที่ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งหมด (ไม่มีเส้นทางเชื่อมโยงระหว่างตัวแปร) หรือตัวแบบที่เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม กับตัวแบบตามทฤษฎีหรือตัวแบบตามสมมติฐาน จะถูกเรียกว่า “Model” ที่มี df หรือ d คือ Degree of freedom ของตัวแบบ

3. ดัชนีรากของค่าเฉลี่ยกำลังสองของส่วนเหลือ (Root mean squared residual: RMR) ใช้เฉพาะกรณีที่เป็นกรเปรียบเทียบโดยใช้ข้อมูลชุดเดียวกัน โดยดัชนีนี้จะบอกขนาดของส่วนที่เหลือจากการเปรียบเทียบระดับความกลมกลืนของตัวแบบสองตัวแบบกับข้อมูลเชิงประจักษ์ และจะใช้ได้ดีเมื่อตัวแปรภายนอกและตัวแปรสังเกตได้เป็นตัวแปรมาตรฐาน ค่าดัชนียิ่งเข้าใกล้ศูนย์ แสดงว่าตัวแบบมีความกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์

4. ดัชนีวัดระดับความกลมกลืน (Goodness-of-fit indices: GFI) ดัชนีที่ใช้ประโยชน์จากค่า Chi-square ในการเปรียบเทียบระดับความสอดคล้องกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์ของตัวแบบสองตัวแบบ ซึ่งข้อมูลอาจจะมาจากข้อมูลชุดเดียวกันหรือข้อมูลต่างชุดกันก็ได้ โดยดัชนีนี้ได้จากการหาอัตราส่วนของผลต่างระหว่างฟังก์ชันความกลมกลืน (fit or not-fitting function) จากตัวแบบก่อนปรับ (ที่มีค่า Chi-square สูง) และหลังปรับ (ที่มีค่า Chi-square ลดลงมากกว่าค่าแรก) กับฟังก์ชันความกลมกลืนก่อนปรับตัวแบบ เป็นค่าที่ไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของกลุ่มตัวอย่าง ยิ่งมีค่าเข้าใกล้ 1.00 แสดงว่าตัวแบบมีความกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์ อีกทั้งยังเหมาะกับการทดสอบความตรงไขว้อย่างละเอียด (cross validation) ที่มีการนำตัวแบบไปทดสอบกับกลุ่มตัวอย่างย่อยที่ถูกสุ่มมาเนื่องจากไม่มีกลุ่มตัวอย่างต่างชุด และกลุ่มตัวอย่างที่ทำการวิจัยขนาดใหญ่

5. ดัชนีวัดระดับความกลมกลืนที่ปรับแก้แล้ว (Adjust GFI: AGFI) เป็นการนำดัชนี GFI มาปรับแก้ โดยคำนึงถึงขนาดขององศาอิสระ ซึ่งรวมทั้งจำนวนตัวแปรและขนาดของกลุ่มตัวอย่าง ในการเปรียบเทียบตัวแบบสองตัวแบบ ข้อมูลอาจจะมาจากข้อมูลชุดเดียวกันหรือข้อมูลต่างชุดกันก็ได้

6. รากกำลังสองเฉลี่ยของค่าความแตกต่าง (Root mean square error off approximation: RMSEA) เมื่อข้อตกลงเบื้องต้นของค่า Chi-square ที่ว่าตัวแบบการวิจัยมีความตรงนั้นไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง และไม่ให้ค่าสถิติขึ้นอยู่กับองศาอิสระ และเหมาะกับการทดสอบความตรงไขว้อย่างละเอียด (cross validation) ที่มีการนำตัวแบบไปทดสอบกับกลุ่มตัวอย่างย่อยที่ถูกสุ่มมาเนื่องจากไม่มีกลุ่มตัวอย่างต่างชุด และกลุ่มตัวอย่างที่ทำการวิจัยขนาดใหญ่มาก และวิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมนำมาพิจารณาถึงความสอดคล้องกันมาก

7. NFI (Norm fit index) ใช้เปรียบเทียบตัวแบบการวิจัยว่ามีความกลมกลืนสูงกว่าตัวแบบอิสระ (ตัวแบบที่ตัวแปรสังเกตได้ทั้งหมดเป็นอิสระกัน) มากน้อยเพียงไร โดยจะบ่งชี้เป็นเปอร์เซ็นต์ที่สอดคล้อง และเหมาะที่จะใช้เพื่อเปรียบเทียบกับตัวแบบอิสระที่ให้ค่า Chi-square สูงมาก

8. RFI (Relative fit index) มีความหมายเช่นเดียวกับค่า NFI แต่ไม่ได้แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ แสดงเพียงความมากน้อยของความกลมกลืนที่ของตัวแบบการวิจัยสูงกว่าตัวแบบอิสระ

9. IFI (Incremental fit index) มีความหมายเช่นเดียวกับค่า RFI แต่ให้ความสำคัญกับการเปรียบเทียบกันระหว่างจำนวนองศาอิสระของทั้งสองตัวแบบ

อนึ่ง การประมาณค่าความสอดคล้องของตัวแบบ (measures of overall fit) อาจจะมีนักวิชาการบางท่านที่มีความเห็นที่แตกต่างออกไปเช่น Joreskog & Sorbom (2012) ที่กำหนดค่า RMR, RMSEA <0.01 และค่า GFI, AGFI, NFI, RFI และ IFI >0.95 เป็นต้น

ตารางที่ 1 ดัชนีตัวแบบ (Comparative Fit)

ดัชนี	ค่าอยู่ระหว่าง	H ₀ : ตัวแบบตามทฤษฎีกับข้อมูลสอดคล้องกัน	ปฏิเสธ H ₀ เมื่อมีค่ามากเกินไป	สูตรในการคำนวณ
χ^2		สอดคล้องกัน	มากเกินไป	$\chi^2 = (n-1)F[S, \Sigma(\theta)]$ $df = \frac{1}{2}(p+q)(p+q+1) - t$
RMR	0 ถึง 1	สอดคล้องกัน	<0.05	$RMR = \left[2 \sum_{i=1}^{p+q} \sum_{j=1}^i (s_{ij} - \hat{\sigma}_{ij})^2 / (p+q)(p+q+1) \right]^{\frac{1}{2}}$
GFI	0 ถึง 1	สอดคล้องกัน	>0.90	$GFI = 1 - \frac{(s - \hat{\sigma})' W^{-1} (s - \hat{\sigma})}{s' W^{-1} s}$ $GFI = 1 - \{F[S, \Sigma(\theta)] / F[S, \Sigma(0)]\}$
AGFI	0 ถึง 1	สอดคล้องกัน	>0.90	$AGFI = 1 - \frac{(p-q)(p+q+1)}{2d} (1 - GFI)$
RMSEA	0 ถึง 1	สอดคล้องกัน	<0.05	$RMSEA = \sqrt{\frac{F_0}{(p-q)}}$
NFI	0 ถึง 1	สอดคล้องกัน	>0.90	$NFI = \frac{\chi_{null}^2 - \chi_{model}^2}{\chi_{null}^2}$
RFI	0 ถึง 1	สอดคล้องกัน	>0.90	$RFI = \frac{(\chi_{null}^2 - \chi_{model}^2) - [df_{null} - (df_{model} / n)]}{\chi_{null}^2 - (df_{null} / n)}$
IFI	0 ถึง 1	สอดคล้องกัน	>0.90	$IFI = \frac{\chi_{null}^2 - \chi_{model}^2}{\chi_{null}^2 - df_{model}}$

จากตารางที่ 1 สามารถแสดงการเปรียบเทียบค่าดัชนีต่าง ๆ ได้ดังนี้

เมื่อ	n	แทน	ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง
	S	แทน	เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมจากกลุ่มตัวอย่าง
	Σ	แทน	เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมที่ได้จากค่าประมาณพารามิเตอร์
	$F = F[S, \Sigma(\theta)]$	แทน	ค่าต่ำสุดของฟังก์ชันความกลมกลืนของตัวแบบจากพารามิเตอร์ θ
	$F = F[S, \Sigma(0)]$	แทน	ค่าต่ำสุดของฟังก์ชันความกลมกลืนของตัวแบบจากพารามิเตอร์ทั้งหมด
	F_0	แทน	ค่าสูงสุดของฟังก์ชันความกลมกลืนของตัวแบบจากตัวแบบทั้งหมด
	p	แทน	จำนวนตัวแปรที่สังเกตได้ที่เป็นตัวแปรอิสระ X
	q	แทน	จำนวนตัวแปรที่สังเกตได้ที่เป็นตัวแปรตาม Y
	s	แทน	สมาชิกในแนวแยง และได้แนวแยงของเมทริกซ์ S
	σ	แทน	สมาชิกในแนวแยง และได้แนวแยงของเมทริกซ์ σ
	t	แทน	จำนวนพารามิเตอร์ที่ถูกประมาณค่าอย่างอิสระ
	i	แทน	เส้นทางที่ i (สมการที่ i) ในตัวแบบโครงสร้างแบบเต็มรูปแบบ
	j	แทน	เส้นทางที่ j (สมการที่ j) ในตัวแบบโครงสร้างแบบตามสมมติฐาน
	d	แทน	degree of freedom ของตัวแบบ
	χ^2_{null}	แทน	ค่า square-Chi ของตัวแบบเต็มรูปแบบ
	χ^2_{model}	แทน	ค่า square-Chi ของตัวแบบตามสมมติฐาน
	df_{null}	แทน	จำนวนเส้นทางที่มีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่คำนวณได้เป็น 0 ในตัวแบบโครงสร้างแบบเต็มรูปแบบ
	df_{model}	แทน	จำนวนเส้นทางที่มีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่คำนวณได้เป็น 0 ในตัวแบบโครงสร้างแบบตามสมมติฐาน

รายละเอียดอื่น ๆ ในการประเมินความเหมาะสม (detailed assessment of fit) คือ การตรวจสอบหาแหล่งที่ทำให้ตัวแบบไม่มีประสิทธิภาพ

1. ส่วนเหลือมาตรฐาน (Standardized residuals) จะแสดงในรูปแบบ Stem and leaf plot (หากค่ากระจายไปทางบวกมากหรือลบมาก อาจจะเป็นไปได้ว่า มีการประมาณค่าสูงหาต่ำกว่าความเป็นจริง) และ Q-plot (ถ้าเบี่ยงเบนไปจากจุดที่อยู่แน่นในบริเวณของเส้น 45 องศา บ่งชี้ถึงความไม่เป็นโค้งปกติของตัวแปรหรือความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างตัวแปร) และถ้าค่าส่วนเหลือมาตรฐานมีค่ามากกว่า 2.58 บ่งชี้ว่า ตัวแบบไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ

2. ดัชนีการปรับตัวแบบ (Modification index) เป็นค่าผลต่างของค่า Chi-square ระหว่าง 2 ตัวแบบ ถ้ามีค่ามากแสดงว่า พารามิเตอร์นั้นมีส่วนช่วยให้ตัวแบบสอดคล้องกับข้อมูล

การปรับโมเดล (Model modification)

การปรับโมเดล ประกอบด้วย 2 วิธี ได้แก่ การปรับโมเดลสมการโครงสร้างในส่วนที่เป็นความคลาดเคลื่อน และการปรับโมเดลสมการโครงสร้างในส่วนที่เป็นโมเดลการวัดหรือโมเดลโครงสร้าง (Anderson & Gebing, 1988)

1. การปรับโมเดลสมการโครงสร้างในส่วนที่เป็นความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าที่เกิดจากเครื่องมือที่ใช้ในการวัด ประเด็นนี้สามารถทำการปรับโมเดลได้ทันที ไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของโมเดลตามสมมติฐาน เมื่อปรับโมเดลจนได้ ค่าดัชนีตรวจสอบความสอดคล้อง ได้แก่ 1) ค่าสถิติทดสอบไคส-แควร์มีค่าน้อยกว่า ค่าไคสแควร์เกณฑ์ หรือค่าไคสแควร์สัมพัทธ์มีค่าน้อยกว่าสอง 2) ค่าดัชนีตรวจสอบความกลมกลืน (GFI, AGFI, CFI, TLI และ NFI) มีค่ามากกว่า 0.90 และ 3) ค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่า (RMSEA RMR SRMR) มีค่าน้อยกว่า 0.05 โดยที่ ค่าพารามิเตอร์ของโมเดลการวัดและโมเดลสมการโครงสร้างทุกเส้นมีค่าแตกต่างจากศูนย์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($|t| > 1.96$) รวมทั้งมีทิศทางที่สมเหตุสมผลตามทฤษฎี จึงจะสามารถสรุปได้ว่าโมเดลสมการโครงสร้างที่พัฒนาขึ้นมีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์

2. การปรับโมเดลสมการโครงสร้างในส่วนที่เป็นการตัดหรือเพิ่มการประมาณค่าพารามิเตอร์ของโมเดลการวัดและ/หรือโมเดลสมการโครงสร้าง ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งปัญหาอาจเกิดจากการที่โมเดลตามสมมติฐานที่กำหนดขึ้นไม่มีความแข็งแรงเพียงพอ ขาดการทบทวนอย่างถี่ถ้วน การทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแล้วยังไม่พบข้อสรุปที่ชัดเจน ประเด็นนี้ไม่สามารถกระทำได้ถ้าไม่มีการตั้งสมมติฐานทางเลือกก่อนวิเคราะห์โมเดลสมการโครงสร้าง ดังนั้นถ้าผู้วิจัยไม่มั่นใจว่าโมเดลสมการโครงสร้างที่พัฒนาขึ้น จะสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์หรือไม่ จำเป็นต้องเสนอโมเดลทางเลือก (alternative model) ก่อนทำการวิเคราะห์ข้อมูล โดยอาจเสนอโมเดลทางเลือกไว้หลายทางเลือกก็ได้ โดยการคัดเลือกโมเดลที่ดีที่สุดนั้นจะต้องทำการปรับโมเดลจนกระทั่งค่าดัชนีตรวจสอบความสอดคล้องของโมเดลผ่านเกณฑ์ตามกำหนด หลังจากนั้นจึงทำการพิจารณาคัดเลือกโมเดลทางเลือกที่ดีที่สุดโดยใช้ค่าสถิติทดสอบ χ^2 Model - df, AIC หรือ BIC

การพัฒนาโมเดล (Model Development)

Bollen (1989) ได้กล่าวถึงการพัฒนาตัวแบบไว้ 2 วิธี ได้แก่ 1) การพัฒนาโมเดลสมการโครงสร้างด้วยวิธีการแบบสองขั้นตอน (Two step Approach to Modeling) และ 2) การพัฒนาโมเดลสมการโครงสร้างด้วยวิธีการแบบสี่ขั้นตอน (Four step Approach to Modeling) ดังนี้

วิธีที่ 1 การพัฒนาตัวแบบแบบสองขั้นตอน (Two step Approach to Modeling)

ในปี 1988 Anderson และ Gerbing ได้เสนอวิธีการแบบสองขั้นตอน (Two step approach to modeling) ในการพัฒนาโมเดลสมการโครงสร้าง โดยมีขั้นตอนการพัฒนาโมเดลดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ตรวจสอบโมเดลการวัด (Measurement model) โดยพิจารณาว่าตัวแปรแฝงที่ผู้วิจัยทำการศึกษาวัดมาจากตัวแปรสังเกตได้ที่กำหนดไว้หรือไม่ ดังนั้นสิ่งที่ต้องดำเนินการในขั้นตอนนี้ก็คือต้องดูว่าตัวแปรแฝงในโมเดลสมการโครงสร้างที่พัฒนาขึ้นมีทั้งหมดกี่ตัวแปร และต้องทำการตรวจสอบโครงสร้างโมเดลการวัดของตัวแปรแฝงทุกตัวแปรก่อนว่าสามารถวัดได้จากตัวแปรสังเกตได้ที่กำหนดโดยใช้วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน (confirmatory factor analysis)

ขั้นตอนที่ 2 วิเคราะห์โมเดลสมการโครงสร้าง (Structural model) พิจารณาความสอดคล้องของโมเดลที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลเชิงประจักษ์ โดยดูจากค่าดัชนีความสอดคล้องของโมเดล ค่าพารามิเตอร์แต่ละเส้น และความสมเหตุสมผลของขนาดและทิศทางของค่าพารามิเตอร์แต่ละเส้น

วิธีที่ 2 การพัฒนาตัวแบบแบบสี่ขั้นตอน (Four step Approach to Modeling)

Mulaik & Millsap (2000) ได้เสนอวิธีการแบบสี่ขั้นตอน (Four step approach to modeling) ในการพัฒนาโมเดลสมการโครงสร้าง โดยมีขั้นตอนการพัฒนาโมเดล ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 วิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ (Exploratory factor analysis) ของตัวแปรแฝงแต่ละตัวแปรเพื่อทำการคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญเข้าสู่โมเดลการวัด

ขั้นตอนที่ 2 ตรวจสอบโมเดลการวัด (Measurement model) ของตัวแปรแฝงแต่ละตัวแปรเพื่อยืนยันโครงสร้างของโมเดลการวัดในขั้นตอนแรกว่าตัวแปรแฝงที่ผู้วิจัยทำการศึกษาวัดมาจากตัวแปรสังเกตได้ที่กำหนดไว้หรือไม่

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรแฝงในโมเดลสมการโครงสร้างว่ามีความสัมพันธ์เพียงพอที่จะนำมาวิเคราะห์โมเดลสมการโครงสร้างหรือไม่

ขั้นตอนที่ 4 วิเคราะห์โมเดลสมการโครงสร้าง (Structural Equation Modeling) พิจารณาความสอดคล้องของโมเดลที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลเชิงประจักษ์ โดยดูจากค่าดัชนีความสอดคล้องของโมเดล ค่าพารามิเตอร์แต่ละเส้น และความสมเหตุสมผลของขนาดและทิศทางของค่าพารามิเตอร์แต่ละเส้น

โมเดลสมการโครงสร้าง ยังมีศักยภาพสามารถวิเคราะห์โมเดลความสัมพันธ์เชิงสาเหตุพหุระดับ (Multi-level causal model) โมเดลการวิเคราะห์องค์ประกอบระยะยาว (Longitudinal factor analysis model) โมเดลกลุ่มพหุ (Multiple population models) โมเดลโค้งพัฒนาการแบบมีตัวแปรแฝง (Latent growth curve model) และโมเดลอื่นๆ (Vanitbuncha, 2015) รวมทั้งสามารถวิเคราะห์โมเดลสมการโครงสร้าง ที่ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไม่เป็นแบบเส้นตรงได้อีกหลายโมเดล (Anderson & Gebing, 1988)

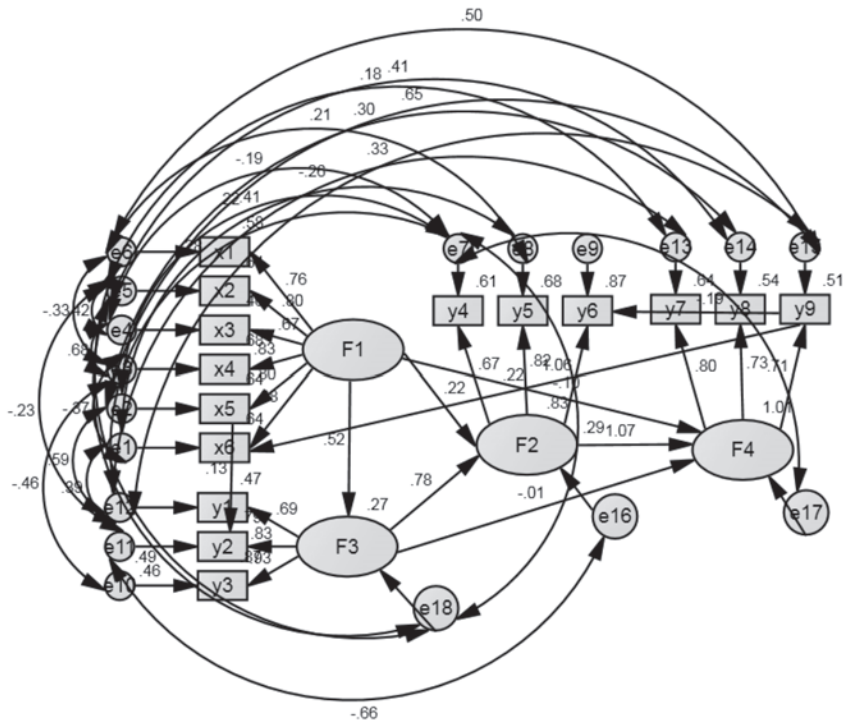
ตัวอย่างการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้าง (Structural Equation Modeling: SEM)

การวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้าง จากการศึกษาเรื่อง Model of Total Service Quality, Market Orientation and Marketing Innovation towards Performance of Private Hospitals in Thailand (Songsraboon, 2016) แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้าง ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 วิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน (Confirmatory factor analysis: CFA)

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบค่าสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสังเกตได้

ขั้นตอนที่ 3 ทำการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้าง ด้วยโปรแกรม Analysis of Moment Structure: AMOS V.6



$\chi^2 = 106.745$, $df = 56$, $P = 0.451$, $CMIN/DF = 1.906$, $GFI = 0.938$, $RMSEA = 0.006$ * $P < 0.05$

ภาพที่ 3 การวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้าง (Structural Equation Modeling: SEM)

สรุปผลการวิเคราะห์รูปแบบคุณภาพบริการโดยรวม การมุ่งเน้นตลาด และนวัตกรรมทางการตลาดที่มีผลต่อการดำเนินงานของโรงพยาบาลเอกชนในประเทศไทยรวมทุกขนาด จากภาพที่ 3 พบว่า สัดส่วนค่าสถิติไคสแควร์/ค่าชั้นแห่งความอิสระ (χ^2/df) มีค่าเท่ากับ 1.906 ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ คือน้อยกว่า 2 เพื่อพิจารณาดัชนีกลุ่มที่กำหนดไว้ตามเกณฑ์ของสมการโครงสร้างที่กำหนดไว้ระดับมากกว่าหรือเท่ากับ 0.90 พบว่า ดัชนีทุกตัวได้แก่ $GFI = 0.938$, $AGFI = 0.967$, $NFI = 0.965$, $IFI = 0.983$, $CFI = 0.983$ ผ่านเกณฑ์ ส่วนดัชนีที่กำหนดไว้ที่ระดับน้อยกว่า 0.05 พบว่า ดัชนี $RMR = 0.019$ และ $RMSEA = 0.006$ ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้เช่นเดียวกัน จึงสรุปได้ว่ารูปแบบคุณภาพบริการโดยรวม การมุ่งเน้นตลาด และนวัตกรรมทางการตลาดที่มีผลต่อการดำเนินงานของโรงพยาบาลเอกชนในประเทศไทยรวมทุกขนาด



References

- Vanitbuncha, K. (2015). **Structure Equation Model by AMOS** (1st ed.). Bangkok: Chulalongkorn Printing.
- Songsraboon, R. (2016). **Model of total service quality, market orientation and marketing innovation towards performance of private hospitals in Thailand**. Dissertation. Siam University, Bangkok, Thailand.
- Anderson, J. C. & Gerbing, D. W. (1988). **Structural equation modeling in practice: A review and recommended two-step approach**. *Psychological Bulletin*, 103, 411-423.
- Bollen, K. A. (1989). **Structural equations with latent variables**. New York: Wiley.
- Joreskog, K. G., & Sorbom, D. (2012). **LISREL 9.1: LISREL syntax guide**. Chicago: Scientific Software International.
- Marcoulides, G. A., & Schumacker, R. E. (2001). **New developments and techniques in structural equation modeling**. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Mulaik, S. A., & Millsap, R. E. (2000). Doing the four-step right. **Structural equation modeling**, 7, 36-73.
- Schumacker, R. E., & Lomax, R. G. (2010). **A beginner's guide to structural equation modeling** (3rd ed.). New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Tenko, R., & Marcoulides, G. A. (2006). **A first course in structural equation modeling** (2nd ed.). New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.