



รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การตรวจหาเครื่องจักรที่ผลิตสินค้าบกพร่องเพื่อวางแผนป้องกัน
และบำรุงรักษาโดยใช้ตัวแบบฮิดเดนมาร์คอฟ:กรณีศึกษา
โรงงานผลิตเครื่องดื่ม

**Detection of Machines Producing Defective Products for
Prevention and Maintenance Planning Using Hidden
Markov Model : Case Study for Soft Drink Manufacturing
Factory**

นายพิษณุ ทองขาว

นางศรวิไล พวงน้อย

นายบรรพต ชุนจันทร์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณปี พ.ศ. 2557

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อเรื่อง : การตรวจหาเครื่องจักรที่ผลิตสินค้าบกพร่องเพื่อวางแผนป้องกันและบำรุงรักษาโดยใช้
ตัวแบบฮิดเดนมาร์คอฟ:กรณีศึกษาโรงงานผลิตเครื่องต้ม

ผู้วิจัย : นายพิษณุ ทองขาว นางศรีวิไล พวงน้อย นายบรรพต ขุนจันทร์

พ.ศ. : 2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอตัวแบบ ฮิดเดนมาร์คอฟ ในการตรวจหาเครื่องจักรที่มีหัวบรรจุหลายหัวในการผลิตเครื่องต้ม สำหรับควบคุมคุณภาพกระบวนการผลิตเพื่อลดสินค้าที่มีข้อบกพร่องหรือสินค้าเสีย และเปรียบเทียบตัวแบบฮิดเดนมาร์คอฟที่นำเสนอ กับตัวแบบ Generalized Estimating Equations (GEE) ข้อมูลรายเดือน จำนวนครั้งของการทำงานบกพร่องของหัวบรรจุ การแก้ไขข้อบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องต้ม และระยะเวลาในการแก้ไข รวบรวมจากเครื่องจักรบรรจุน้ำดื่มที่มีหัวบรรจุหลายหัว ที่สุ่มเลือกมา 1 เครื่อง จากโรงงานแห่งหนึ่งในจังหวัดปทุมธานี สถานะของเครื่องจักรที่ซ่อนอยู่มี 2 สถานะคือ ใช้งานได้ และใช้งานไม่ได้ ความน่าจะเป็นที่หัวบรรจุเครื่องต้มจะอยู่ในสถานะใดในแต่ละเดือนอยู่ในรูปตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบโลจิสติกส์ การประมาณค่าพารามิเตอร์ใช้วิธีการของเบย์ ผลการวิจัยพบว่า การแก้ไขข้อบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องต้ม มีโอกาสที่หัวบรรจุเครื่องต้มนั้นจะยังคงอยู่ในสถานะ ใช้งานไม่ได้ มากกว่าการที่ไม่ได้แก้ไขข้อบกพร่องของหัวบรรจุนั้น อยู่ 1.4550 เท่า การเพิ่มขึ้นของเวลาที่ใช้ในการแก้ไขข้อบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องต้ม 1 หน่วยเวลา มีโอกาสที่หัวบรรจุเครื่องต้มนั้นจะยังคงอยู่ในสถานะ ใช้งานไม่ได้ มากกว่าการที่ใช้เวลาแก้ไขข้อบกพร่องเดิม อยู่ 1.4550 เท่า และ ถ้าเดือนที่ผ่านมามีหัวบรรจุเครื่องต้มอยู่ในสถานะ ใช้งานไม่ได้ เดือนปัจจุบันมีโอกาสที่หัวบรรจุเครื่องต้มจะอยู่ในสถานะใช้งานไม่ได้ มากกว่าการที่จะเปลี่ยนมาอยู่ในสถานะ ใช้งานได้ อยู่ 1.4550 เท่า

คำสำคัญ: ตัวแบบฮิดเดนมาร์คอฟ, วิธีการของเบย์, วิธีเชิงตัวเลข, สินค้าบกพร่อง, โรงงานผลิตเครื่องต้ม

Title : Detection of Machines Producing Defective Products for Prevention and Maintenance Planning Using Hidden Markov Model : Case Study for Soft Drink Manufacturing Factory

Researcher : Mr. Pitsanu Tongkhow, Mrs. Srivilai Phuaknoy, Mr. Bunpot Khuncechan
Year : 2014

Abstract

This research proposes a hidden Markov model for detecting machines, with multiple fillers, producing soft drink, for quality control, in order to reduce defective products. The proposed model is compared with a classical generalized estimating equations model (GEE). The monthly data, the number of defective products, the correctness and the time spending in correction, were collected from a machine in a sample factory in Pratumthanee province. The two hidden states of the fillers are workable and unworkable. The states has a logistic distribution. The results show that the correctness of the filler error occurrence does not improve the probability of being in a unworkable state, neither the period of time spending on correction. The current state seems to be the same as the previous state

Keywords: Hidden Markov Model, Bayesian method, Numerical method, defective products, soft drink factory

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง การตรวจหาเครื่องจักรที่ผลิตสินค้าบกพร่องเพื่อวางแผนป้องกันและบำรุงรักษาโดยใช้ตัวแบบฮิดเดนมาร์คอฟ: กรณีศึกษาโรงงานผลิตเครื่องดื่ม สำเร็จลงด้วยดี ด้วยการสนับสนุนและความช่วยเหลือจากหลายท่าน คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ. สุภัทรา โกไศยกานนท์ รักษาการแทนอธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ผศ. ดร. วัลลภ ภูผาคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ ผศ.จุฑามาศ พิรพัชระ ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา ที่ให้การสนับสนุนการทำงานวิจัยของอาจารย์ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร มาตั้งแต่เริ่มต้น

ท้ายนี้คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้ทุนสนับสนุนจนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี

คณะผู้วิจัย



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 นิยามคำศัพท์เฉพาะที่ใช้ในการวิจัย	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	16
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	16
3.2 การดำเนินการวิจัย	16
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	22
4.1 ผลการตรวจสอบความถี่ของ MCMC	22
4.2 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์	30
4.3 ผลการเปรียบเทียบตัวแบบ	37
4.4 ผลการประเมินความแม่นยำของค่าประมาณพารามิเตอร์	37

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	39
5.1 สรุปผลการวิจัย	39
5.2 อภิปรายผลการวิจัย	40
5.3 ข้อเสนอแนะ	41
บรรณานุกรม	42
ภาคผนวก	44
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	44
ประวัติผู้วิจัย	64



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องมือทางสถิติที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการควบคุมคุณภาพในอุตสาหกรรมการผลิต คือ แผนภูมิควบคุม (Control chart) ซึ่งมีหลายประเภทเช่นแผนภูมิ $\bar{X}$ -chart และแผนภูมิ P-chart เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วแผนภูมิควบคุมเป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจติดตามการทำงานของเครื่องจักรหนึ่งๆ ที่ผลิตสินค้าได้ครั้งละหนึ่งชิ้น แต่ยังมีกระบวนการผลิตอีกหลายชนิดที่เครื่องจักรหนึ่งๆ สามารถผลิตสินค้าได้จำนวนมากพร้อมๆ กัน เช่น เครื่องบรรจุน้ำดื่มที่มีหัวบรรจุหลายหัว เรียงกันเป็นวงกลม ขวดบรรจุน้ำดื่มที่ผลิตได้มักจะรวมกันเมื่อเคลื่อนออกจากเครื่องจักร ทำให้ไม่สามารถบอกได้ว่าขวดใดผลิตมาจากหัวบรรจุใด ในขบวนการควบคุมคุณภาพเราจะนำเอาขวดบรรจุน้ำดื่มมาตรวจสอบว่าได้มาตรฐานหรือไม่ คำนวณค่าสัดส่วนของสินค้าที่ไม่ได้มาตรฐาน การตรวจติดตามหาเครื่องจักรเสียลักษณะนี้อาจใช้แผนภูมิ P-chart ได้ แต่แผนภูมิ P-chart ไม่สามารถบอกได้ว่าหัวบรรจุใดทำงานบกพร่อง และสถานการณ์แบบนี้อาจเกิดขึ้นได้กับอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกมากหลายประเภท

โดยปกติในโรงงานอุตสาหกรรม มักจะมีการเก็บรวบรวมข้อมูลเครื่องจักรที่ทำงานบกพร่องไว้อย่างต่อเนื่อง สามารถสรุปได้ว่าในแต่ละเดือนเครื่องจักรแต่ละเครื่อง ทำงานบกพร่องกี่ครั้ง เครื่องจักรแต่ละเครื่องจะมีสถานะที่ซ่อนอยู่คือ เครื่องจักรนั้นอยู่ในสถานะใช้งานได้ หรือใช้งานไม่ได้ การทำงานบกพร่องบ่อยครั้ง บ่งบอกให้รู้ว่าเครื่องจักรอยู่ในสถานะใช้งานไม่ได้ ควรต้องปิดเครื่องทำการซ่อมบำรุง แต่ถ้าเครื่องจักรทำงานบกพร่องน้อยครั้ง บ่งบอกให้รู้ว่าเครื่องจักรนั้นอยู่ในสถานะ ใช้งานได้ และการเปลี่ยนสถานะของเครื่องจักรที่ซ่อนอยู่ในแต่ละเดือน เป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการวางแผนป้องกันไม่ให้เกิดชิ้นงานเสียในกระบวนการผลิต

ตัวแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนครั้งของการทำงานบกพร่องของเครื่องจักร เพื่อเชื่อมโยงไปสู่สถานะของเครื่องจักรว่า ใช้งานได้ หรือใช้งานไม่ได้ ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือ ตัวแบบฮิดเดนมาร์คอฟ (Hidden Markov Models) ที่ใช้วิธีการของเบย์ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ การใช้ตัวแบบฮิดเดนมาร์คอฟ สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลเครื่องจักรบกพร่องในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องดื่ม ที่มีหลายหัวบรรจุในหนึ่งเครื่อง ในประเทศไทยยังไม่มีมีการใช้มาก่อน ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะนำตัวแบบนี้มาใช้วิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าว ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัยนี้คือ จะช่วยให้ผู้บริหารวางแผน ตัดสินใจในการดำเนินการเพื่อลดจำนวนชิ้นงานที่บกพร่องที่เกิดขึ้น และนำหลักการวิจัยนี้ไปใช้แก้ปัญหาเกี่ยวกับอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อนำเสนอตัวแบบ ฮิตเดนมาร์คอฟ ในการตรวจหาเครื่องจักรที่มีหัวบรรจุหลายหัว ในการผลิตเครื่องดื่ม สำหรับควบคุมคุณภาพ กระบวนการผลิตเพื่อลดสินค้าที่มีข้อบกพร่องหรือสินค้าเสีย

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบตัวแบบฮิตเดนมาร์คอฟที่นำเสนอ กับตัวแบบ Generalized Estimating Equations (GEE)

1.3 สมมติฐานการวิจัย

สมมติฐานในการวิจัยคือ สถานะของเครื่องจักรในเดือนที่ผ่านมา การไขข้อบกพร่อง และระยะเวลาในการแก้ไขข้อบกพร่อง มีอิทธิพลต่อสถานะของเครื่องจักร

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากร คือ เครื่องจักรบรรจุน้ำดื่มที่มีหัวบรรจุหลายหัว ทุกเครื่องในโรงงาน

ตัวอย่าง คือ เครื่องจักรบรรจุน้ำดื่มที่มีหัวบรรจุหลายหัว ที่สุ่มเลือกมา 1 เครื่อง

1.4.2 ตัวแปรสำหรับการวิจัย

ตัวแปรตาม คือ จำนวนครั้งของการทำงานบกพร่องของเครื่องจักร

ตัวแปรต้น สถานะของเครื่องจักรในเดือนที่ผ่านมา การไขข้อบกพร่อง และระยะเวลาในการแก้ไขข้อบกพร่อง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.2.2 เพื่อนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์ด้านการวางแผนป้องกัน และแก้ไขปัญหาในโรงงาน ตัวอย่าง

1.2.3 เพื่อใช้หลักการและโปรแกรมที่เขียนได้ไปประยุกต์ใช้กับ อุตสาหกรรมการผลิตด้านอื่นๆ

1.6. นิยามศัพท์เฉพาะที่ใช้ในการวิจัย

1.6.2 ตัวแบบฮิดเดนมาคอฟ ตัวแบบที่ใช้กับข้อมูลมีสถานะบางอย่างซ่อนอยู่

1.6.1 เครื่องจักรทำงานบกพร่อง หมายถึงเครื่องจักรผลิตสินค้าออกมาบกพร่อง

1.6.3 สถานะของเครื่องจักร หมายถึงเครื่องจักรอยู่ในสภาพทำงานได้ หรือทำงานไม่ได้ อย่างใดอย่างหนึ่ง



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การดำเนินการวิจัยเรื่อง การตรวจหาเครื่องจักรที่ผลิตสินค้าบกพร่องเพื่อวางแผนป้องกันและบำรุงรักษาโดยใช้ตัวแบบฮิดเดนมาร์คอฟ: กรณีศึกษาโรงงานผลิตเครื่องดื่ม ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามหัวข้อดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 Poisson Regression Models

2.1.2 Bayesian models

2.1.3 Hidden Markov Models

2.1.4 GEE

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 Poisson Regression Models

McCullagh and Nelder (1989) อธิบายตัวแบบ Poisson Regression Models สรุปได้ดังนี้

ตัวแบบการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) ถูกนำมาใช้เมื่อต้องการประเมินความสัมพันธ์ของตัวแปรตามและตัวแปรต้น และใช้สำหรับการพยากรณ์ การอนุมาน และการทดสอบสมมติฐาน การถดถอยเชิงเส้นมีรูปแบบดังคือ

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \text{ และ } \boldsymbol{\varepsilon} \sim \text{MVN}(\mathbf{0}, s^2 \mathbf{I})$$

เมื่อ $\mathbf{Y} = [Y_1, \dots, Y_n]^T$ คือเวกเตอร์ของตัวแปรตาม $\mathbf{X}$ คือ ตัวแปรต้นเป็นเซตที่มีขนาด $n \times p$ และ $\boldsymbol{\beta}$ คือสัมประสิทธิ์การถดถอย เป็นเวกเตอร์ขนาด p เวกเตอร์ $\boldsymbol{\varepsilon}$ คือเวกเตอร์ขนาด n ของความคลาดเคลื่อน โดยสมาชิกของ $\boldsymbol{\varepsilon}$ เป็นอิสระกัน และมีการแจกแจงแบบปกติ คือ $\varepsilon \stackrel{\text{i.i.d.}}{\sim} N(0, s^2)$ ตัวแบบการถดถอยเหมาะสำหรับข้อมูลของตัวแปรตามที่มีการแจกแจงแบบปกติ ไม่เหมาะกับข้อมูลที่ตัวแปรตามเป็นข้อมูลไม่ต่อเนื่อง เช่น ข้อมูลที่ตัวแปรตามเป็นจำนวนนับ ที่ผู้วิจัยทำการศึกษาในครั้งนี้ สมมติให้ $Y_i \sim \text{Poisson}(l_i), i = 1, \dots, n$

ให้ $Y_i, i = 1, \dots, n$ เป็นตัวแปรตามที่มีค่าเป็นจำนวนนับ มีการแจกแจงแบบ Poisson มีค่าเฉลี่ย เท่ากับค่าความแปรปรวน เท่ากับ m_i นั่นคือ $Y_i: \text{Poisson}(m_i)$ การแจกแจงความน่าจะเป็นของ Y_i เขียนได้ดังนี้

$$P(Y_i = y_i; m_i) = \frac{e^{-m_i} m_i^{y_i}}{y_i!}, y_i = 0, 1, 2, \dots$$

$$\text{และ } E(Y_i) = \text{Var}(Y_i) = m_i$$

ให้ $\mathbf{X}_i = (X_{i0}, X_{i1}, \dots, X_{ip})^T, i = 1, \dots, n$ เป็นตัวแปรต้นที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ Y_i รูปแบบความสัมพันธ์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางคือ canonical link ที่มีรูปแบบเป็น natural log function

ให้ $\boldsymbol{\beta}_i = (b_0, b_1, \dots, b_p)^T$ เป็นพารามิเตอร์ เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$E(Y_i) = m_i = e^{\mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\beta}}$$

สามารถประมาณค่า $\boldsymbol{\beta}$ ได้ โดยใช้วิธีการของ maximum likelihood และแก้สมการหาคำตอบโดยใช้ numerical iterative method

2.1.2 Hierarchical Bayesian models

Condon (2006) อธิบายตัวแบบเบย์ไว้ดังนี้

ให้ $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ เป็นตัวอย่างสุ่มขนาด n มี distribution เป็น $f(y | \theta)$ โดยที่ θ เป็นค่าของตัวแปรสุ่ม Θ และ Θ มี distribution เป็น $g(\theta)$

$X_1, X_2, \dots, X_p$ เป็นตัวแปรร่วม (covariate)

Likelihood function คือ $f(y_1, y_2, \dots, y_n | \theta) = \prod_{i=1}^n f(y_i | \theta)$

เรียก $g(\theta)$ ว่า Prior distribution

Posterior distribution คือ
$$f(\theta | y_1, y_2, \dots, y_n) = \frac{\prod_{i=1}^n f(y_i | \theta) g(\theta)}{\int \prod_{i=1}^n f(y_i | \theta) g(\theta) d\theta}$$

เรียก $\int \prod_{i=1}^n f(y_i | \theta) g(\theta) d\theta$ ว่า Prior predictive distribution

จะเห็นว่า
$$f(\theta | y_1, y_2, \dots, y_n) \propto \prod_{i=1}^n f(y_i | \theta) g(\theta)$$

สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ใน Posterior distribution คือการหาค่าของพารามิเตอร์แบบจุด (point estimate) ที่ทำให้ Posterior distribution มีค่าสูงสุด ถ้า Posterior distribution มีมิติ (dimension) ขนาดใหญ่ จะทำให้มีค่า local maximum จำนวนมาก ในอดีตการหาจุดที่ทำให้ Posterior distribution มีค่าสูงสุดอาจจะเป็นไปไม่ได้เลย จนกระทั่งค้นพบวิธีการของ Monte Carlo สำหรับการประมาณค่า จึงทำให้มีการนำ Posterior distribution ไปใช้อย่างกว้างขวาง

Monte Carlo Method ใช้หลักการดังนี้ คือ ถ้าต้องการรู้ค่าพารามิเตอร์ของการแจกแจงใด ก็จะใช้การสุ่มตัวอย่างจากการแจกแจงนั้น ซ้ำกันหลาย ๆ ครั้ง แล้วดูผล (Result) ที่เกิดขึ้นในการสุ่มตัวอย่างแต่ละครั้ง เช่น ถ้าต้องการคำนวณค่า Posterior expected value ซึ่งต้องคำนวณจากสูตรต่อไปนี้

$$E(\theta | y_1, y_2, \dots, y_n) = \int \theta f(\theta | y_1, y_2, \dots, y_n) d\theta$$

เมื่อสร้าง ลำดับการสุ่มตัวอย่างแบบสุ่ม จำนวน G ครั้ง กำหนดให้เป็น $\theta^{(1)}, \theta^{(2)}, \dots, \theta^{(G)}$ จาก $f(\theta | y_1, y_2, \dots, y_n)$ ก็จะสามารถประมาณค่า Posterior expected value ได้จาก

$$E(\theta | y_1, y_2, \dots, y_n) = \int \theta f(\theta | y_1, y_2, \dots, y_n) d\theta \approx \frac{1}{G} \sum_{g=1}^G \theta^{(g)}$$

ความถูกต้องของค่าประมาณขึ้นอยู่กับ algorithms ที่ใช้สำหรับสุ่มตัวอย่างและจำนวนครั้งของการสุ่ม algorithm ที่ใช้แก้ปัญหาในงานของเบย์ ที่ใช้กันมากคือ Gibbs Sampling algorithms และ Metropolis-Hastings algorithms ทั้ง 2 ประเภทนี้เป็นวิธีการของ Markov Chain Monte Carlo (MCMC) คือ ลำดับของการสุ่มตัวอย่าง $\theta^{(1)}, \theta^{(2)}, \dots, \theta^{(G)}$ เป็นอิสระกัน และครั้งที่ $\theta^{(g+1)}$ ของการสุ่มตัวอย่าง ขึ้นอยู่กับการสุ่มตัวอย่างครั้งก่อนหน้านั้น $\theta^{(g)}$ เท่านั้น

จำนวนครั้งของการสุ่มขึ้นอยู่กับ การลู่เข้าหาการแจกแจงใดการแจกแจงหนึ่งของ MCMC (Convergence of MCMC) ซึ่งพิจารณาได้จาก Trace Plots, History Plots, Kernel density plots และ Autocorrelation Plots โดยที่ Trace Plots และ History Plots ต้องมีลักษณะเป็น แนวเส้นตรง ไม่มีลักษณะของแนวโน้ม Kernel density plots ต้องเป็นโค้งเรียบไม่สูงๆ ต่ำๆ และ Autocorrelation Plots และ Autocorrelation ต้องลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อจำนวน Lag เพิ่มขึ้น คือ ไม่ควรเกิน Lag ที่ 50 (Casella and George, 1992)

2.1.3 Hidden Markov Models

Rabiner (1989) อธิบายตัวแบบ Hidden Markov Models ไว้ดังนี้ Hidden Markov Models เกิดขึ้นเป็นครั้งแรกในราวปลายทศวรรษที่ 1960 และได้รับความสนใจต่อเนื่องมาตลอด และเพิ่มมากยิ่งขึ้น เนื่องจากเป็น Model ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายสาขา ตัวอย่างเช่น การประยุกต์ใช้ในเรื่องการรู้จำคำพูด (Speech Recognition)

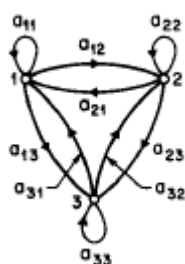
สำหรับ Discrete Markov Process ให้ System หนึ่งประกอบด้วย N States (สถานะ) เช่น $N = 3$ แต่ละ State แทนด้วย s_1, s_2, s_3 เช่น

ให้ s_1 แทน ฝนตก

s_2 แทน เมฆมาก

s_3 แทน ร้อน

a_{ij} แทนความน่าจะเป็นที่ State ที่ i จะเปลี่ยนไปเป็น State ที่ j เรียกว่า a_{ij} ว่า State Transition Probability



สมมติว่ารู้ค่า a_{ij} เราสามารถเขียนอยู่ในรูป Matrix ได้ดังนี้

$$A = \{a_{ij}\} = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.3 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 \\ 0.1 & 0.1 & 0.8 \end{bmatrix}$$

ถ้าเราต้องการหาค่าความน่าจะเป็นที่อีก 7 วันต่อจากนี้ สภาพ อากาศจะเป็น

ร้อน, ร้อน, ร้อน, ฝนตก, ฝนตก, ร้อน, เมฆมาก, ร้อน

เราสามารถหาได้ดังนี้

$$\text{ให้ } O = \{s_3, s_3, s_3, s_1, s_1, s_3, s_2, s_3\}$$

$$\begin{aligned} P(O|Model) &= P\{s_3, s_3, s_3, s_1, s_1, s_3, s_2, s_3 | Model\} \\ &= P[s_3] \cdot P[s_3|s_3] \cdot P[s_3|s_3] \cdot P[s_1|s_3] \cdot P[s_1|s_1] \\ &\quad \cdot P[s_3|s_1] \cdot P[s_2|s_3] \cdot P[s_3|s_2] \\ &= \pi_3 \cdot a_{33} \cdot a_{33} \cdot a_{31} \cdot a_{11} \cdot a_{13} \cdot a_{32} \cdot a_{23} \\ &= 1 \cdot (0.8) \cdot (0.8) \cdot (0.1) \cdot (0.4) \cdot (0.3) \cdot (0.1) \cdot (0.2) \\ &= 1.536 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

π_i ค่าความน่าจะเป็นตั้งต้น (Initial State Probability) ของ s_i

จากตัวอย่างที่ผ่านมาจะเห็นว่า แต่ละ State นั้นเรามองเห็นแต่ในบางสถานการณ์เรามองไม่เห็น State แต่มองเห็นเหตุการณ์อื่นที่มีความสัมพันธ์กับ State เหล่านั้น นั่นคือ State เหล่านั้นถูกซ่อนอยู่ (Hidden) เช่น เรามองเห็นว่าเหรียญเกิด H, H, T, H, H, H, T, T แต่เราไม่รู้ว่ามีผู้โยนใช้เหรียญกี่เหรียญ ถ้า

- ผู้โยนใช้เหรียญ 1 เหรียญ State ที่ซ่อนอยู่ก็จะมีเพียง 1 State $\{s_1\}$
- 2 เหรียญ ก็จะมี 2 States $\{s_1, s_2\}$
- 3 เหรียญ ก็จะมี 3 States $\{s_1, s_2, s_3\}$

หรืออาจจะมียานวน States มากกว่านี้ก็ได้

องค์ประกอบของ HMM ประกอบไปด้วย

- 1) จำนวน States ใน Model = N
- 2) จำนวนสัญลักษณ์ที่ใช้แทนเหตุการณ์ที่มองเห็น = M

- 3) State Transition Probability $A = \{a_{ij}\}$
- 4) Distribution ของเหตุการณ์ที่มองเห็น $B = \{b_j(k)\}$
- 5) ค่าความน่าจะเป็นตั้งต้น (Initial State Probability) π_i

พารามิเตอร์ ของ Model ทั้งหมดคือ N, M ค่าความน่าจะเป็น A, B , และ π

ปัญหาพื้นฐาน 3 ข้อของ HMMs คือ เมื่อกำหนดเหตุการณ์ที่มองเห็นโดยให้ $O = o_1 o_2 o_3 \dots o_T$ และ $\lambda = (A, B, \pi)$ เราจะหาค่าของ $P(O|\lambda)$ ได้อย่างไร

เมื่อกำหนดเหตุการณ์ที่มองเห็นโดยให้ $O = o_1 o_2 o_3 \dots o_T$ และ $\lambda = (A, B, \pi)$ เราจะเลือกลำดับของ State $Q = q_1 q_2 q_3 q_4 \dots q_r$ อย่างไรจึงจะเหมาะสมที่สุด

เราจะปรับค่า $\lambda = (A, B, \pi)$ อย่างไร จึงจะทำให้ $P(O|\lambda)$ มีค่ามากที่สุด

ปัญหาแรกเป็นปัญหาเกี่ยวกับระบบการคำนวณเนื่องจาก Model มีลักษณะเป็นหลายมิติจึงมีสมการหลายชั้นซึ่งจะมีความซับซ้อนคำนวณ

ปัญหาที่ 2 เป็นปัญหาของลำดับการเกิดของ State ที่เรามองไม่เห็น เราไม่มีทางรู้ได้เลยว่าลำดับของ State ที่เกิดขึ้นเป็นอย่างไรเราจึงได้แต่สมมติขึ้นมา แล้วทำการทดสอบหา ลำดับการเกิดแบบใดเหมาะสมที่สุด

ปัญหาที่ 3 เป็นการทำให้ Model มีความสมบูรณ์มากขึ้นโดยจะทำการปรับค่าความน่าจะเป็นเพื่อให้ได้ Model ที่ดีที่สุด

การแก้ปัญหาลำดับของ HMMs

- 1) การแก้ปัญหาลำดับที่ 1 ค่า $P(O|\lambda)$ หาได้จาก

$$\begin{aligned}
 P(O|\lambda) &= \sum_{all Q} P(O|Q, \lambda) P(Q|\lambda) \\
 &= \sum_{q_1, q_2, \dots, q_r} \pi_{q_1} b_{q_1}(O_1) a_{q_1, q_2} b_{q_2}(O_2) \\
 &\quad \dots a_{q_{r-1}, q_r} b_{q_r}(O_r)
 \end{aligned}$$

ถ้าเราคำนวณจากนิยามโดยตรง จะต้องใช้คำสั่งในการคำนวณจำนวนมากเราจึงจำเป็นต้องใช้วิธีอื่นๆ มาช่วยในการลดจำนวนคำสั่งลงวิธีที่นิยมใช้กันมากคือ Forward-Backward Procedure

2) การแก้ปัญหาที่ 2 การหาลำดับของ State ที่เกิดขึ้นที่เหมาะสมที่สุดนั้น วิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ Viterbi Algorithm และอื่นๆ

3) การแก้ปัญหาที่ 3 ปัญหาการปรับค่าพารามิเตอร์ $\lambda = (A, B, \pi)$ เพื่อให้ได้ Model ที่ดีที่สุด

การแก้ปัญหาพื้นฐานของ HMMs

1) การแก้ปัญหาที่ 1 ค่า $P(O|\lambda)$ หาได้จาก

$$\begin{aligned} P(O|\lambda) &= \sum_{all\ Q} P(O|Q, \lambda) P(Q|\lambda) \\ &= \sum_{q_1, \dots, q_r} \pi_{q_1} b_{q_1}(O_1) a_{q_1, q_2} b_{q_2}(O_2) \dots a_{q_{r-1}, q_r} b_{q_r}(O_r) \end{aligned}$$

ถ้าเราคำนวณจากนิยามโดยตรง จะต้องใช้คำสั่งในการคำนวณจำนวนมาก เราจึงจำเป็นต้องใช้วิธีอื่นๆ มาช่วยในการลดจำนวนคำสั่งลง วิธีที่นิยมใช้กันมากคือ Forward-Backward Procedure

2) การแก้ปัญหาที่ 2 การหาลำดับของ State ที่เกิดขึ้นที่เหมาะสมที่สุดนั้น วิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ Viterbi Algorithm และอื่นๆ

3) การแก้ปัญหาที่ 3 ปัญหาการปรับค่าพารามิเตอร์ $\lambda = (A, B, \pi)$ เพื่อให้ $P(O|\lambda)$ มีค่ามากที่สุด วิธีที่นิยมใช้กันมากคือ Baum-Welch Method และ EM (Expectation-Modification) Algorithm

การประยุกต์ใช้ HMMs ในเรื่องการจำคำพูด (Speech Recognition) หลักการประยุกต์ใช้ HMMs ในเรื่องการจำคำพูด คือเราจะต้องสร้าง Model สำหรับคำศัพท์แต่ละคำ โดยสร้างจากสัญญาณเสียง สัญญาณเสียงที่เราใช้ในการสร้าง Model นั้น เราไม่ได้ใช้สัญญาณเสียงทั้งหมด แต่จะดึงเฉพาะค่าสำคัญของเสียงออกมา เราเรียกค่าสำคัญนี้ว่า Speech Feature ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของเสียง โดยเก็บไว้ในรูป เวกเตอร์ แต่ละเวกเตอร์จะแทนสัญญาณเสียงยาวประมาณ 20 มิลลิวินาทีที่ค่อยๆ เลื่อนไปแบบ Overlap เช่นเลื่อนไปที่ละ 10 มิลลิวินาที ดังรูปที่ 1 ดังนั้นหากมีเสียงที่ยาว

1 วินาทีเข้ามา ก็จะแทนด้วยเวกเตอร์จำนวน 100 เวกเตอร์ ลำดับของเวกเตอร์ที่แทนสัญญาณเสียงนี้เราเรียกว่า Observation Sequence

เสียงพูดคำศัพท์แต่ละครั้งนั้นเป็นลำดับของสัญญาณที่มองเห็นได้ แล้วทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ $\lambda = (A, B, \pi)$ ใน HMMs ของคำศัพท์แต่ละคำ และเมื่อมีสัญญาณของคำศัพท์ที่เราที่เราไม่รู้ว่าเป็นคำใดเข้ามาเป็น $o = \{o_1 o_2 o_3 \dots o_r\}$ เมื่อเราคำนวณค่า $P(O|\lambda)$ เราก็จะบอกได้ว่าสัญญาณที่เข้ามานั้นน่าจะเป็นสัญญาณของคำศัพท์ใด

HMMs ในเรื่อง กระบวนการผลิต ตัวอย่างเช่นมีเครื่องจักร 2 เครื่อง กำหนดให้เป็นเครื่องจักร A และ B แต่ละเครื่องผลิตสินค้าออกมาได้เครื่องละ 5 ชิ้น ตรวจสอบจำนวนชิ้นเสียของสินค้า สมมุติว่าความน่าจะเป็นที่เครื่องจักรแต่ละเครื่องจะผลิตสินค้าออกมาเสียดังนี้

เสีย	0	1	2	3	4	5
A	1/8	1/8	1/4	1/4	1/8	1/8
B	7/10	1/10	1/10	1/30	1/30	1/30

ในการตรวจสอบสินค้าเสียนั้น เราไม่รู้ที่สินค้าเสียมาจากเครื่องจักรใด รู้แต่เพียงว่า ความน่าจะเป็นที่จะมาจากเครื่องจักร A เป็น 0.3 และความน่าจะเป็นมาจากเครื่องจักร B เป็น 0.7 สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบ HMMs ได้ดังนี้

$N = 2$, $M = 6$, $S = \{A, B\}$, $\pi = (0.3, 0.7)$ และ

Transition probability matrix คือ $\begin{pmatrix} 0.3 & 0.7 \\ 0.3 & 0.7 \end{pmatrix}$

2.1.4 ตัวแบบ Generalized Estimating Equation (GEE)

GEE เป็นตัวแบบที่ใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์เมื่อค่าสังเกตของตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กัน

ให้ Y_{ij} , $j = 1, \dots, n_i$ $i = 1, \dots, K$ แทนค่าสังเกตของหน่วยศึกษาที่ i ในครั้งที่ j

ให้ N แทนจำนวนค่าสังเกตทั้งหมด $N = \sum_{i=1}^K n_i$

Y_{ij} มีความสัมพันธ์กับตัวแปรต้น $X_{ij} = (X_{ij,0}, X_{ij,1}, \dots, X_{ij,p})^T$ และพารามิเตอร์

$\beta = (b_0, b_1, \dots, b_p)^T$ ตามรูปแบบของ link function ต่อไปนี้

Identity link: $g(a) = a$

Natural log link for count data: $g(a) = \log(a)$

Logit link for binary data: $g(a) = \log(a/(1-a))$

ความสัมพันธ์ของ Y_{ij} กับ $\mathbf{X}_{ij} = (X_{ij,0}, X_{ij,1}, \dots, X_{ij,p})^T$ เขียนได้ดังนี้

$g(E(Y_{ij} | \mathbf{x}_{ij})) = \mathbf{x}_{ij}^T \boldsymbol{\beta}$ และเรียกความสัมพันธ์นี้ว่า Marginal regression model

Covariance Matrix ของ $\mathbf{Y}_i = (Y_{i1}, \dots, Y_{ij})^T$ คือ $\mathbf{V}_i = \phi \mathbf{A}_i^{1/2} \mathbf{R}(\rho) \mathbf{A}_i^{1/2}$

เมื่อ ϕ คือ dispersion parameter

$\mathbf{A}_i$ คือ diagonal matrix of variance function

และ $\mathbf{R}(\rho)$ คือ รูปแบบความสัมพันธ์ของข้อมูลของ $\mathbf{Y}_i = (Y_{i1}, \dots, Y_{ij})^T$ ซึ่งมีหลายรูปแบบต่อไปนี้

1) Exchangeable มีโครงสร้างความสัมพันธ์คือ

$$\mathbf{R}(\rho) = \begin{bmatrix} 1 & \rho & \cdots & \rho \\ \rho & 1 & \cdots & \rho \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho & \rho & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

2) First-order Autoregressive มีโครงสร้างดังนี้

$$\mathbf{R}(\rho) = \begin{bmatrix} 1 & \rho & \cdots & \rho^{J-1} \\ \rho & 1 & \cdots & \rho^{J-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho^{J-1} & \rho^{J-2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

3) Unstructured มีโครงสร้างดังนี้

$$\mathbf{R}(\rho) = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1J} \\ \rho_{12} & 1 & \cdots & \rho_{2J} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{1J} & \rho_{2J} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

การประมาณพารามิเตอร์ $\boldsymbol{\beta}$ ใช้ Algorithm ต่อไปนี้

- 1) คำนวณค่าเริ่มต้นสำหรับ β โดยคำนวณมาจากตัวแบบ generalized linear model ที่กำหนดให้ข้อมูลเป็นอิสระกัน
- 2) คำนวณค่า $\mathbf{R}_i(\rho)$
- 3) คำนวณค่า $\mathbf{V}_i = \phi \mathbf{A}_i^{1/2} \hat{\mathbf{R}}(\rho) \mathbf{A}_i^{1/2}$
- 4) ปรับค่า β
- 5) ทำซ้ำจนกระทั่ง β ลู่เข้า (Convergence)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tai (2009) ได้ศึกษาวิจัยเรื่อง Detection of machine failure: Hidden Markov Model approach โดยนำเสนอตัวแบบฮิดเดนมาร์คอฟ และประยุกต์ใช้ตรวจสอบกดจับเครื่องจักรที่ทำงานบกพร่องในการควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิต ตัวแบบที่นำเสนอมีทั้งแบบที่ใช้กับสินค้าที่แยกไม่ออกว่ามาจากเครื่องจักรใด คือเมื่อสินค้าถูกผลิตออกมาจากแต่ละเครื่องจักรจะเคลื่อนที่ไปรวมกัน และแบบที่ใช้กับสินค้าที่บอกได้มาว่าผลิตจากเครื่องจักรใด

Rabiner (1989) นำเสนอตัวแบบ HMM สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลการจำคำพูดและ ข้อมูลกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เช่นเครื่องกลึง เครื่องเจาะ ซึ่งข้อมูลมักจะถูกจัดเก็บอย่างต่อเนื่อง ณ เวลาต่างๆ

Wang et al. (2002) ใช้ตัวแบบ HMM ในการสะกดติดตามสภาพการสึกหรอของเครื่องมือในกระบวนการกลึง ข้อมูลเก็บรวบรวมจากสัญญาณการสั่นสะเทือนขณะทำการกลึง

Ertunc et al. (2001) ประยุกต์ใช้ตัวแบบ HMM กับข้อมูลในกระบวนการเจาะโดยใช้ข้อมูลแรงที่ใช้ตัด และสัญญาณตรวจจับแรงบิด เพื่อติดตามสภาพการสึกหรอของเครื่องมือ ซึ่งประกอบด้วยสภาพ คม ทำงานได้ และ ที่อ

Atlas et al. (2000) ประยุกต์ใช้ HMM สำหรับข้อมูลสัญญาณสั่นสะเทือนในกระบวนการกลึงในโรงงานอุตสาหกรรม และนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยตัวแบบ HMM ไปวิเคราะห์ต่อด้วยตัวแบบเชิงเส้นวางนัยทั่วไป (Generalized Linear Model หรือ GLM) เพื่อพยากรณ์การสึกหรอของเครื่องมือ

Strachan (2009) นำเสนออัลกอริทึมที่เหมาะสมสำหรับการสะกดติดตามการสึกหรอของเครื่องมือใน และเครื่องมือที่เกือบจะใช้งานไม่ได้ ในกระบวนการกลึงในอุตสาหกรรมการผลิต อัลกอริทึมที่นำเสนอมีฐานมาจาก HMM

Juang and Rabiner (1991) ประยุกต์ใช้ HMM ในเรื่องการจำคำพูด

จากการศึกษางานวิจัยดังกล่าวข้างต้น การใช้ตัวแบบฮิดเดินมาร์คอฟ สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลเครื่องจักรบกร่องในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องดื่ม ที่มีหลายหัวบรรจุในหนึ่งเครื่อง ในประเทศไทยยังไม่มีการใช้มาก่อน ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะนำตัวแบบนี้มาใช้วิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าว



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอตัวแบบฮิดเดนมาร์คอฟ เพื่อใช้ตรวจหาเครื่องจักรที่ทำงานบกพร่อง และใช้ในการอธิบายผลของการแก้ไขเครื่องจักรที่ทำงานบกพร่อง และระยะเวลาในการแก้ไข ที่มีต่อความเป็นไปได้ที่เครื่องจักรนั้นจะอยู่ในสถานะ ใช้งานได้ หรือใช้งานไม่ได้ เครื่องจักรที่ทำการศึกษาคือเครื่องจักรบรรจุเครื่องดื่มที่มีหัวบรรจุหลายหัว การประมาณค่าพารามิเตอร์ใช้วิธีการของเบย์ และใช้วิธีการเชิงตัวเลขสำหรับหาความแม่นยำของค่าพารามิเตอร์ ตัวแปรตามคือ จำนวนครั้งของการทำงานบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องดื่ม และปัจจัยที่ศึกษาคือ ระยะเวลาที่ใช้ในการแก้ไขการทำงานบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องดื่ม วัสดุที่ใช้ในการวิจัย และการดำเนินการวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

- 3.1.1 คอมพิวเตอร์พกพา
- 3.1.2 คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ
- 3.1.3 พรินเตอร์
- 3.1.4 โปรแกรม R, OpenBUGS และ R2OpenBUGS

3.2 การดำเนินการวิจัย

3.2.1 ข้อมูลและแหล่งข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา รวมจากการจดบันทึกการทำงานของเครื่องบรรจุเครื่องดื่มเครื่องหนึ่งที่มีหัวบรรจุ 16 หัว ในโรงงานผลิตเครื่องดื่มแห่งหนึ่งในจังหวัดปทุมธานี ปี 2556 ประกอบด้วยจำนวนครั้งของการทำงานบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องดื่ม ในแต่ละเดือน และระยะเวลารวมทั้งหมดที่ใช้ในการแก้ไข ตั้งแต่เดือนมกราคม 2556 ถึง พฤศจิกายน 2556

3.2.2 ขอบเขตการวิจัย

3.2.2.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากร คือ เครื่องบรรจุเครื่องดื่มทั้งหมดในโรงงาน

ตัวอย่าง คือ เครื่องบรรจุเครื่องดื่ม 1 เครื่อง โดยใช้วิธีการสุ่มอย่างง่าย

3.2.2.2 ตัวแปรสำหรับการวิจัย

ตัวแปรต้น คือ การแก้ไขเครื่องจักรที่ทำงานบกพร่อง และระยะเวลาในการแก้ไข

ตัวแปรตาม คือ จำนวนครั้งของการทำงานบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องตี

3.2.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.2.3.1 ศึกษาหัวเรื่องต่อไปนี ตัวแบบฮิตเดนมาร์คอฟตัว แบบการถดถอยแบบปัวซอง ตัวแบบโลจิสติกส์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวแบบฮิตเดนมาร์คอฟ

3.2.3.2 ตัวแบบที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูล มีลักษณะดังนี้

กำหนดให้ y_{it} แทน จำนวนครั้งของการเกิดการทำงานบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องตี หัวที่ i ในเดือนที่ t

$$y_{it} | s_{it} \stackrel{iid}{\sim} \text{Pois}(\theta_{it})$$

$$\log(\theta_{it}) = \lambda_0 + \lambda_1 s_{it}$$

$$s_{it} | s_{i(t-1)} \sim \text{Bin}(p, 1)$$

$$\text{logit } p = \beta_0 + \beta_1 s_{i(t-1)} + \beta_2 \text{Correct}_{it} + \beta_3 \text{Time}_{it}$$

$$\text{or } \frac{\log p}{\log(1-p)} = \beta_0 + \beta_1 s_{i(t-1)} + \beta_2 \text{Correct}_{it} + \beta_3 \text{Time}_{it}$$

$$C_{it_0} \sim \text{Bin}(\pi_0, 1)$$

$$\pi_0 \sim \text{Beta}(1, 1)$$

เมื่อ Pois, Bin, และ Beta แทน การแจกแจงแบบปัวซอง (Poisson) ไบโนเมียล (Binomial) และการแจกแจงแบบ เบต้า (Beta) ตามลำดับ $\lambda_0, \lambda_1, \beta_0, \beta_1, \beta_2$ และ β_3 คือสัมประสิทธิ์การถดถอย θ_{it} คือค่าเฉลี่ยของการแจกแจงแบบปัวซอง ซึ่งค่าเฉลี่ยนี้ถูกกำหนดโดยอิทธิพลของสถานะของหัวบรรจุเครื่องตี๋ม (ใช้งานได้ หรือ ใช้งานไม่ได้) และอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการแก้ไขการทำงานบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องตี๋ม สถานะของหัวบรรจุเครื่องตี๋ม s_{it} เป็นสถานะที่ซ่อนอยู่สังเกตค่าไม่ได้ คืออาจจะอยู่ในสถานะ ใช้งานได้ หรือ ใช้งานไม่ได้ ก็ได้ สถานะนี้มีสมบัติตามหลักการของมาร์คอฟ โดยความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะเป็นแบบ การถดถอยโลจิสติกส์ กำหนดให้ $s_{i(t-1)}$ เป็นสถานะก่อนหน้า ให้พารามิเตอร์ π_0 เป็นค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นของการที่หัวบรรจุเครื่องตี๋ม อยู่ในสถานะ ใช้งานไม่ได้ ในเดือนที่ 1 ของแต่ละหัวบรรจุเครื่องตี๋ม กำหนดตัวแปรหุ่น (Dummy Variable) $Correct_{it} = 1$ แทน หัวบรรจุเครื่องตี๋ม หัวที่ i เดือนที่ t มีการแก้ไขการข้อบกพร่องแล้ว ในทางตรงกันข้าม $Correct_{it} = 0$ แทน หัวบรรจุเครื่องตี๋ม หัวที่ i ในเดือนที่ t ก่อนมีการแก้ไขข้อบกพร่อง ซึ่งถูกใช้เป็นกลุ่มอ้างอิง $Time_{it}$ คือ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยของปัวซอง เป็นผลรวมของเวลาเวลาที่ใช้ในการแก้ไขการทำงานบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องตี๋ม หัวที่ i ในเดือนที่ t

การประมาณค่าพารามิเตอร์ใช้วิธีการของเบย์ และวิธีเชิงตัวเลขแบบ มาร์คอฟ เซนมอนตอ คาร์โล (Markov chain Monte Carlo หรือ MCMC) ที่ใช้การสุ่มตัวอย่างแบบ กิบส์ (Gibbs Sampling) โดยการเขียนโปรแกรมใน OpenBUGS และประมวลผล ใน R ด้วยแพ็คเกจ R2OpenBUGS การทำงานของ MCMC ประกอบไปด้วยการเขียนการแจกแจงแบบมีเงื่อนไขของพารามิเตอร์แต่ละตัวที่อยู่ในการแจกแจงแบบมีเงื่อนไขของโพสทีเรีย แล้วใช้การสุ่มตัวอย่างแบบ กิบส์เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์แต่ละตัว เมื่อ MCMC ลู่เข้าสู่การแจกแจงใดการแจกแจงหนึ่ง ก็จะได้ค่าประมาณพารามิเตอร์แต่ละตัว และช่วงความน่าเชื่อถือ (Credible Interval) ของพารามิเตอร์แต่ละตัวนั้น

การแจกแจงเบื้องต้น (Prior Distribution) ของพารามิเตอร์ภายใต้วิธีการของเบย์ ต้องมาจากการแจกแจงเบื้องต้น (Prior Distribution) ให้พารามิเตอร์แต่ละตัว ซึ่งนิยมใช้การแจกแจงแบบ Noninformative คือการแจกแจงที่ไม่มีผลต่อการแจกแจงโพสทีเรีย เนื่องจากเรามักไม่ทราบรูปแบบการแจกแจงที่แน่นอนของพารามิเตอร์แต่ละตัว ตัวแบบที่นำเสนอมีการแจกแจงเบื้องต้นดังนี้

กำหนดการแจกแจงเบื้องต้น $N(0, \tau_{\lambda_0}^{-2}), N(0, \tau_{\beta_0}^{-2}), N(0, \tau_{\beta_1}^{-2}), N(0, \tau_{\beta_2}^{-2}),$ and $N(0, \tau_{\beta_3}^{-2})$ ให้กับ $\lambda_0, \beta_0, \beta_1, \beta_2$ และ β_3 ตามลำดับ และ $N(0, \tau_{\lambda_1}^{-2})$ ที่มีค่าบวกเท่านั้นให้กับ λ_1 กำหนดการแจกแจงเบื้องต้น อินเวอร์สแกมมา (Inverse Gamma) หรือ $IG(0.0001, 0.0001)$ ให้กับ $\tau_{\lambda_0}^{-2}, \tau_{\lambda_1}^{-2}, \tau_{\beta_0}^{-2}, \tau_{\beta_1}^{-2}, \tau_{\beta_2}^{-2},$ และ $\tau_{\beta_3}^{-2}$.

3.2.3.3 การลู่เข้าของ MCMC

การตรวจสอบการลู่เข้าของ MCMC พิจารณาจาก History Plots, Kernel Density Plots และ Autocorrelation Plots พบว่า MCMC ลู่เข้าเมื่อมีการสุ่มตัวอย่าง แบบกิบส์ จำนวน 30000 รอบ โดยตัด 10000 รอบแรกทิ้ง

3.2.3.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวแบบ

การประเมินสมรรถนะของตัวแบบ ใช้การเปรียบเทียบกับตัวแบบ Generalized Estimating Equations (GEE) ซึ่งเป็นตัวแบบการถดถอยที่ใช้กับตัวแปรตามที่มีค่าเป็นจำนวนนับ ใช้ค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square Errors หรือ MSE) เป็นเกณฑ์ ตัวแบบที่มีค่า MSE น้อยเป็นตัวแบบที่มีสมรรถนะสูง

ตัวแบบ GEE มีรูปแบบดังนี้

$$y_{it} | \theta_{it} \sim \text{Pois}(\theta_{it})$$

$$\log(\theta_{it}) = \beta_0 + \beta_1 \text{Correct}_{it} + \beta_2 \text{Time}_{it},$$

เมื่อ β_0 , β_1 และ β_2 คือสัมประสิทธิ์การถดถอย θ_{it} คือค่าเฉลี่ยของการแจกแจงแบบปัวซอง $\text{Correct}_{it} = 1$ แทนสภาพของ หัวบรรจุเครื่องยนต์ หัวที่ i เดือนที่ t หลังจากมีการแก้ไขการทำงานบกพร่องแล้ว ในทางตรงกันข้าม $\text{Correct}_{it} = 0$ แทนสภาพของ หัวบรรจุเครื่องยนต์ หัวที่ i ในเดือนที่ t ก่อนมีการแก้ไขการทำงานบกพร่อง ซึ่งถูกใช้เป็นกลุ่มอ้างอิง Time_{it} คือ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยของปัวซอง เป็นผลรวมของเวลาที่ใช้ในการแก้ไขการทำงานบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องยนต์ หัวที่ i ในเดือนที่ t การประมาณค่าพารามิเตอร์ในตัวแบบ GEE ใช้โปรแกรม R

3.2.3.5 การจำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์ เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของค่าประมาณพารามิเตอร์ ใช้การเขียนโปรแกรมใน OpenBUGS และ R2OpenBUGS เกณฑ์ที่ใช้ประเมินความแม่นยำของค่าประมาณพารามิเตอร์คือ ค่าความเอนเอียงเฉลี่ยสัมพัทธ์ (Relative Bias หรือ RB) (Moineddin et al., 2007)

ใช้ค่าประมาณของ $\lambda_0, \lambda_1, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลจริง เป็นค่าจริงของค่าพารามิเตอร์ การจำลองสถานการณ์ มีขั้นตอนดังนี้

- 1) ใช้ตัวแบบที่นำเสนอวิเคราะห์ข้อมูลจริง นำค่าประมาณพารามิเตอร์ของ $\lambda_0, \lambda_1, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ มาใช้เป็นค่าจริงของค่าพารามิเตอร์
- 2) คำนวณค่า θ_{it} จากความสัมพันธ์กับ $\lambda_0, \lambda_1, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, Correct_{it}$ และ $Time_{it}$
- 3) สร้างค่า y_{it} จากการการแจกแจงแบบ ปัวซอง ที่มีค่าเฉลี่ย θ_{it} จำนวน 200 ชุดข้อมูล
- 4) ใช้ตัวแบบที่นำเสนอวิเคราะห์ข้อมูลแต่ละชุด
- 5) คำนวณค่าความเียงเอนสัมพัทธ์ ของพารามิเตอร์แต่ละตัว

ค่าความเียงเอนสัมพัทธ์เป็นอัตราส่วนของผลต่างของค่าประมาณพารามิเตอร์ ($\hat{\theta}_i$) กับค่าจริงของพารามิเตอร์ θ_i

$$RB = \left| \frac{\theta_i - \bar{\theta}_i}{\theta_i} \right|,$$

เมื่อ $\bar{\theta}_i = \frac{1}{S} \sum_{t=1}^S \hat{\theta}_i^t$; S คือจะนวนชุดข้อมูล ค่าประมาณพารามิเตอร์ที่มีความแม่นยำ ไม่ควรมีค่าเกิน 0.05 (Moineddin et al., 2007).

3.3 ประเมินผลการวิจัย

นำผลการวิจัยที่ได้มาวิเคราะห์ และพิจารณาเพื่อหาข้อสรุป และข้อเสนอแนะ

สถานที่เก็บรวบรวมข้อมูล

โรงงานผลิตเครื่องต้ม จ.ปทุมธานี

สถานที่ใช้ในการทำวิจัย

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งตั้งอยู่ที่ศูนย์พระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ระยะเวลาในการวิจัย

เริ่มตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2556 สิ้นสุดการวิจัย 30 กันยายน 2557

บทที่ 4

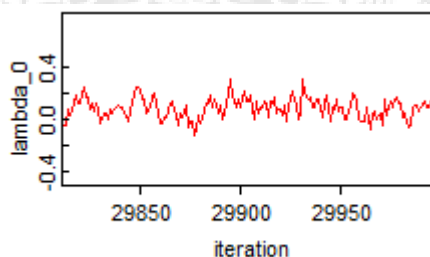
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยเรื่อง การตรวจหาเครื่องจักรที่ผลิตสินค้าบกพร่องเพื่อวางแผนป้องกันและบำรุงรักษาโดยใช้ตัวแบบฮิดเดนมาร์คอฟ: กรณีศึกษาโรงงานผลิตเครื่องดื่ม เป็นการนำเสนอตัวแบบฮิดเดนมาร์คอฟ เพื่อใช้ตรวจหาเครื่องจักรที่บกพร่อง และใช้ในการอธิบายผลของการแก้ไขเครื่องจักรที่บกพร่อง และระยะเวลาในการแก้ไข ที่มีต่อ ความเป็นไปได้ที่เครื่องจักรนั้นจะอยู่ในสถานะ ใช้งานได้ หรือใช้งานไม่ได้ เครื่องจักรที่ทำการศึกษาคือ เครื่องจักรบรรจุน้ำดื่มที่มีหัวบรรจุหลายหัว ตัวแปรตามคือ จำนวนครั้งของการเกิดอาการผิดปกติบนหัวบรรจุน้ำดื่ม และปัจจัยที่ศึกษาคือ ระยะเวลาที่ใช้ในการแก้ไขอาการผิดปกติบนหัวบรรจุน้ำดื่ม ผลการวิจัยแสดงได้ดังรายละเอียดในแต่ละข้อต่อไปนี้

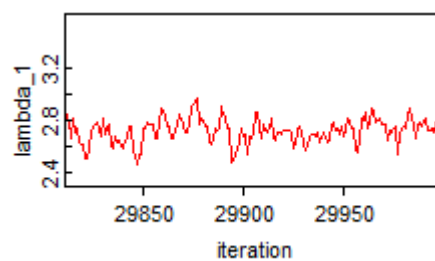
- 4.1 ผลการตรวจสอบความลู่เข้าของ MCMC
- 4.2 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์
- 4.3 ผลการเปรียบเทียบตัวแบบ
- 4.4 ผลการประเมินความแม่นยำของค่าประมาณพารามิเตอร์

4.1 ผลการตรวจสอบความลู่เข้าของ MCMC

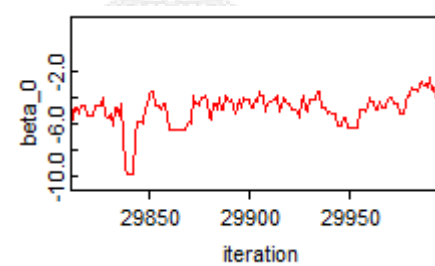
ผลการตรวจสอบความลู่เข้าของ MCMC โดยพิจารณาจากกราฟของ Trace, Kernel Density, History และ Autocorrelation พบว่า MCMC ลู่เข้าสู่การแจกแจงใดการแจกแจงหนึ่งเมื่อมีการสุ่มตัวอย่าง แบบกิบส์ จำนวน 30000 รอบ โดยตัด 10000 รอบแรกทิ้ง กราฟของ Trace แสดงในภาพที่ 4.11 ถึง 4.16 กราฟของ Kernel Density แสดงใน รูปที่ 4.17 ถึง 4.22



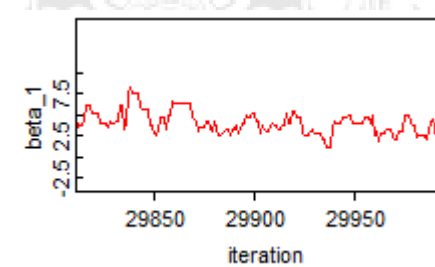
รูปที่ 4.11 Trace ของ λ_0

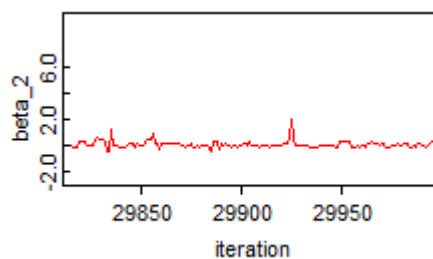
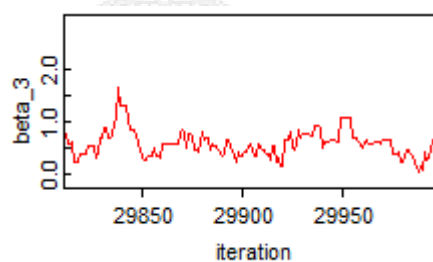


รูปที่ 4.12 Trace ของ λ_1

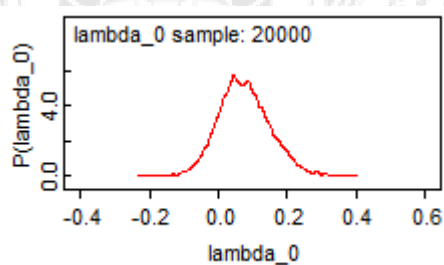


รูปที่ 4.13 Trace ของ β_0

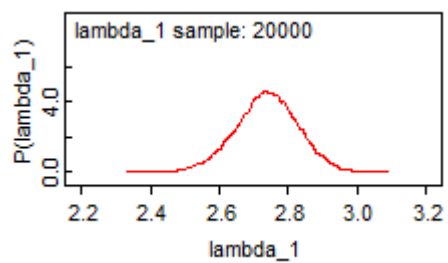


รูปที่ 4.14 Trace ของ β_1 รูปที่ 4.15 Trace ของ β_2 รูปที่ 4.16 Trace ของ β_3

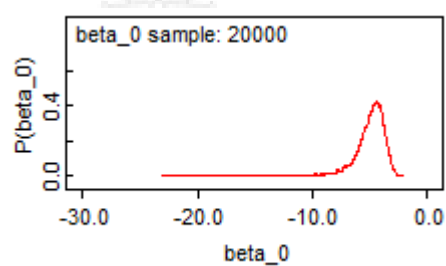
Trace plot ในรูปที่ 4.11- รูปที่ 4.16 ไม่แสดงว่ามีแนวโน้มเกิดขึ้น แสดงถึงการลู่เข้าของ MCMC สำหรับพารามิเตอร์, $\lambda_0, \lambda_1, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$



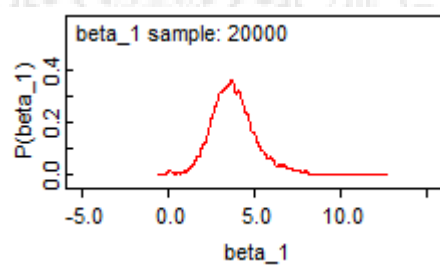
รูปที่ 4.17 Kernel density ของ λ_0



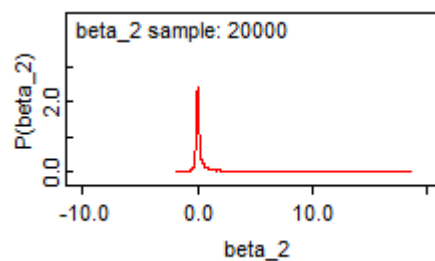
รูปที่ 4.18 Kernel density ของ λ_1



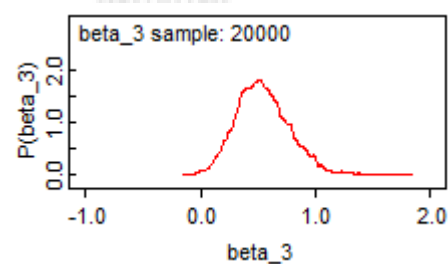
รูปที่ 4.19 Kernel density ของ β_0



รูปที่ 4.20 Kernel density ของ β_1

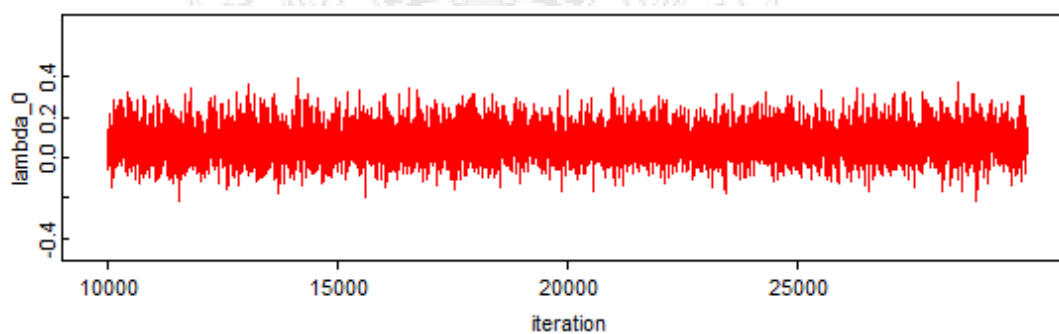


รูปที่ 4.21 Kernel density ของ β_2

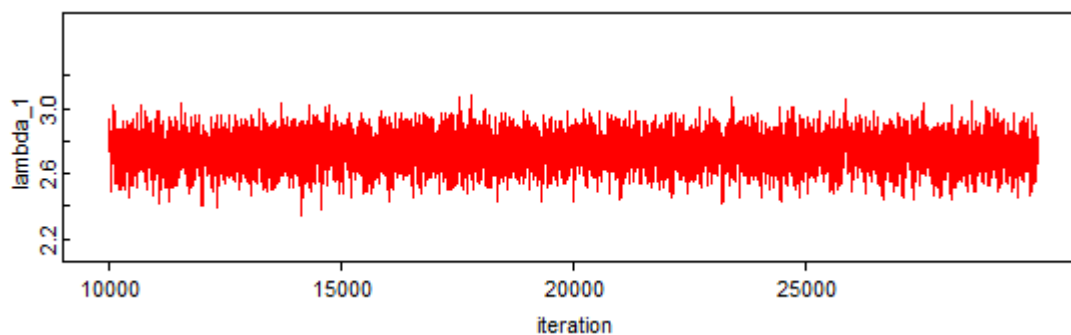


รูปที่ 4.22 Kernel density ของ β_3

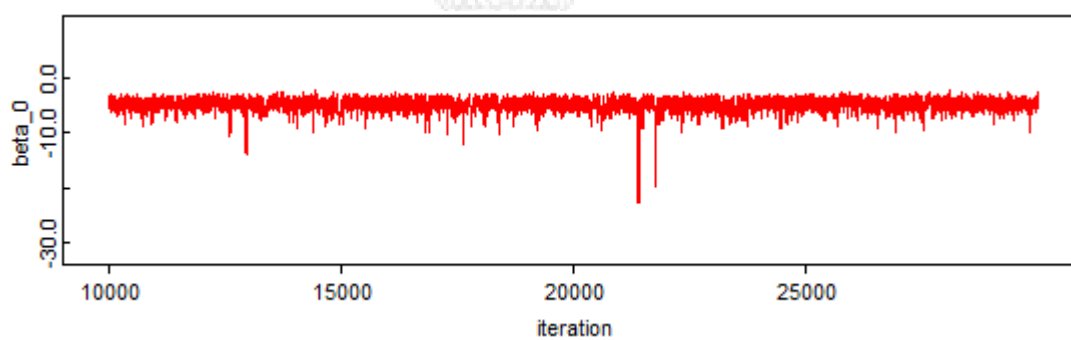
Kernel density ในรูปที่ 4.17- รูปที่ 4.22 มีลักษณะเป็นโค้งเรียบไม่ขรุขระ สูงๆ ต่ำๆ หรือเป็นโค้งสองยอด แสดงให้เห็นว่า MCMC ลู่เข้าหาการแจกแจงใดการแจกแจงหนึ่ง



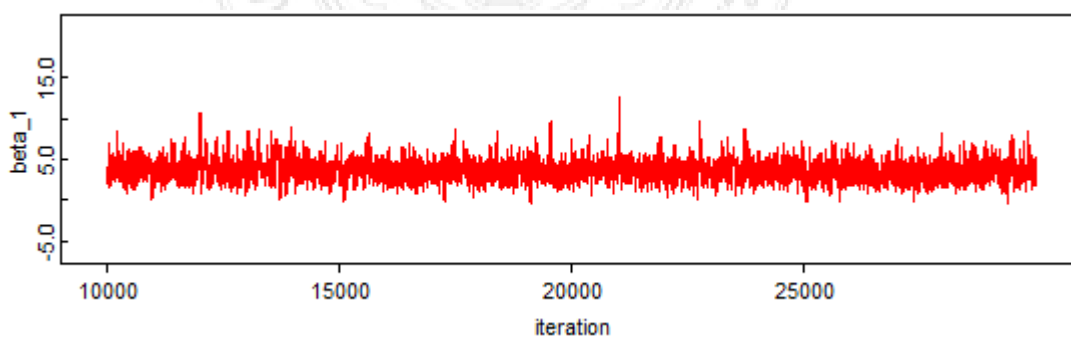
รูปที่ 4.18 History Plot ของ λ_1

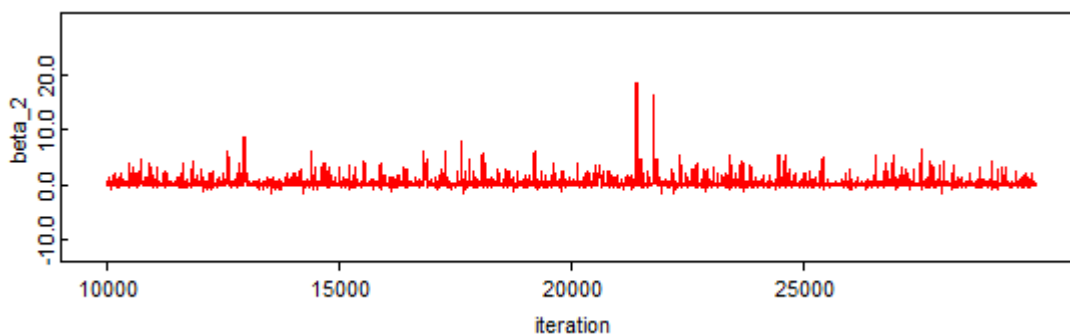
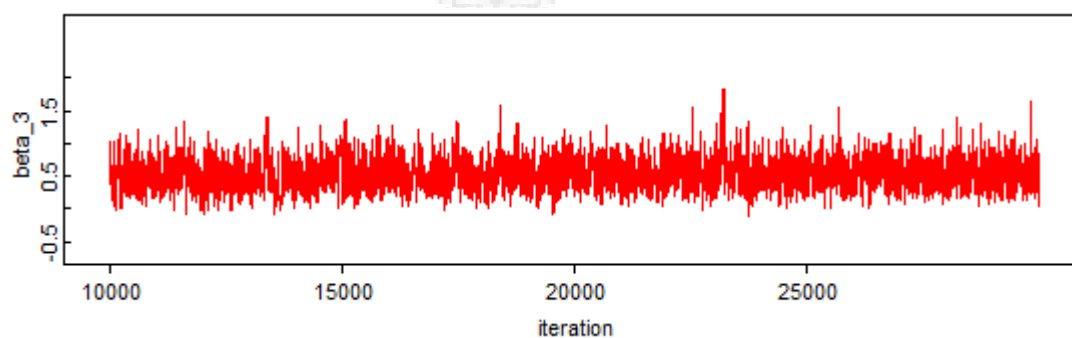


รูปที่ 4.18 History Plot ของ λ_2

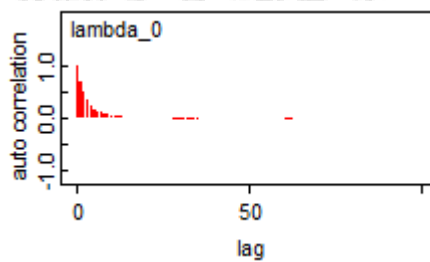


รูปที่ 4.18 History Plot ของ β_0

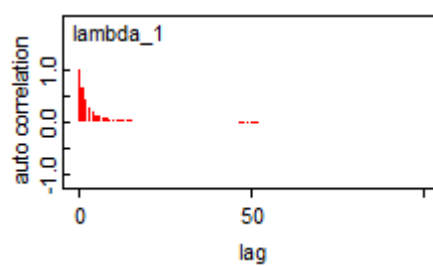


รูปที่ 4.18 History Plot ของ β_1 รูปที่ 4.18 History Plot ของ β_2 รูปที่ 4.18 History Plot ของ β_3

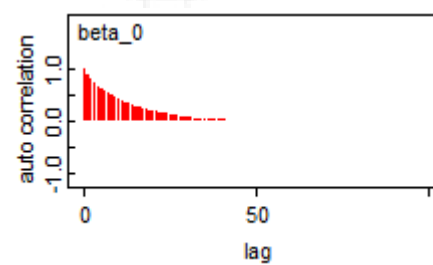
History plot ในรูปที่ 4.17- รูปที่ 4.22 มีลักษณะเป็นแนวตรง แสดงให้เห็นว่า MCMC ลู่เข้า
 หากการแจกแจงใดการแจกแจงหนึ่ง



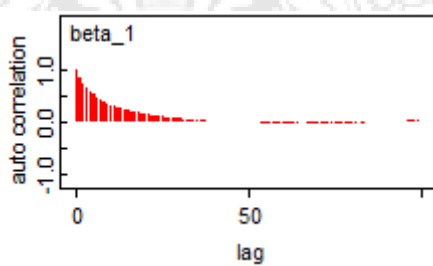
รูปที่ 4.18 Autocorrelation Plot ของ λ_1



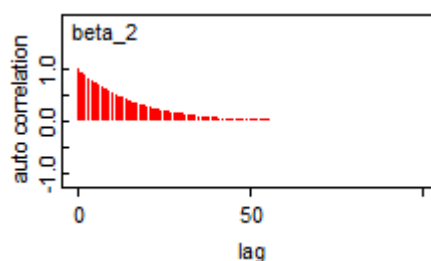
รูปที่ 4.18 Autocorrelation Plot ของ λ_2



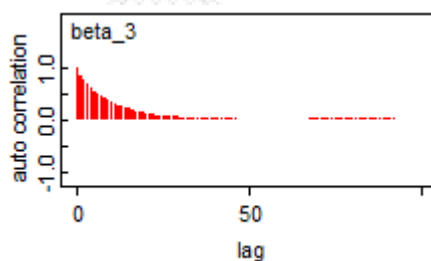
รูปที่ 4.18 Autocorrelation Plot ของ β_0



รูปที่ 4.18 Autocorrelation Plot ของ β_1



รูปที่ 4.18 Autocorrelation Plot ของ β_2



รูปที่ 4.18 Autocorrelation Plot ของ β_3

Autocorrelation plot ในรูปที่ 4.17- รูปที่ 4.22 มีลักษณะลดลงอย่างรวดเร็ว และไม่มี ความสัมพันธ์กันหลัง lag ที่ 50 แสดงให้เห็นว่า MCMC ลู่เข้าหาการแจกแจงใดการแจกแจงหนึ่ง

4.2 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์

ค่าประมาณพารามิเตอร์แต่ละตัวแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าประมาณพารามิเตอร์แต่ละตัว

Parameter	Mean	SD	95% Credible Interval	
λ_0	0.0751	0.0742	-0.0614	0.2298
λ_1	2.7380	0.0901	2.5530	2.9100
β_0	-4.9280	1.3010	-8.0070	-3.2020
β_1	3.7770	1.3510	1.4610	6.9200
β_2 (Correct)	0.3750	1.0590	-0.3449	3.3350
β_3 (Time)	0.5483	0.2384	0.1348	1.0530

จากตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของ Correct คือ β_2 มีค่า 0.3750 และ Odd ratio มีค่าเท่ากับ $\exp(0.3750) = 1.4550$ แสดงให้เห็นว่า การแก้ไขอาการผิดปกติของหัวบรรจุเครื่องดื่ม มีโอกาสที่หัวบรรจุเครื่องดื่มจะยังคงอยู่ในสถานะ ใช้งานไม่ได้ มากกว่าการไม่ได้แก้ไขอาการผิดปกติ อยู่ 1.4550 เท่า หมายความว่า การแก้ไขอาการผิดปกติของหัวบรรจุเครื่องดื่ม ไม่ได้ช่วยให้หัวบรรจุเครื่องดื่มกลับมาอยู่ในสภาพใช้งานได้

ในทำนองเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์ของ Time คือ β_3 มีค่า 0.5483 และ Odd ratio มีค่าเท่ากับ $\exp(0.5483) = 1.7303$ แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของเวลาที่ใช้ในการแก้ไขอาการผิดปกติของหัวบรรจุเครื่องดื่ม 1 หน่วยเวลา มีโอกาสที่หัวบรรจุเครื่องดื่มจะยังคงอยู่ในสถานะ ใช้งานไม่ได้ มากกว่าการที่ใช้เวลาเดิม อยู่ 1.4550 เท่า หมายความว่า การเพิ่มขึ้นของเวลาการแก้ไขอาการผิดปกติของหัวบรรจุเครื่องดื่ม ไม่ได้ช่วยให้หัวบรรจุเครื่องดื่มกลับมาอยู่ในสภาพใช้งานได้

ค่าสัมประสิทธิ์ของ Time คือ β_1 มีค่า 3.7770 และ Odd ratio มีค่าเท่ากับ $\exp(3.7770) = 43.6848$ แสดงให้เห็นว่า สถานะของของหัวบรรจุเครื่องดื่มในเดือนปัจจุบันมีความสัมพันธ์กับสถานะของของหัวบรรจุเครื่องดื่มในเดือนที่ผ่านมา ถ้าเดือนที่ผ่านมาหัวบรรจุเครื่องดื่มอยู่ในสถานะ ใช้งานไม่ได้ เดือนปัจจุบันมีโอกาที่จะอยู่ในสถานะ ใช้งานไม่ได้ มากกว่าการที่จะเปลี่ยนสถานะมาอยู่ในสถานะ ใช้งานได้ อยู่ 1.4550 เท่า

ค่าเฉลี่ยของอาการผิดปกติของหัวบรรจุเครื่องดื่ม ในแต่ละเดือน แสดงในตารางที่ 4.4

Table 4.4 ค่าเฉลี่ยของอาการผิดปกติของหัวบรรจุเครื่องต้ม ในแต่ละเดือน

[หัวบรรจุ,เดือน]	mean	sd	val2.5pc	val97.5pc
[1,2]	16.6900	1.0830	14.5600	18.8100
[1,3]	16.6800	1.1780	14.5300	18.8100
[1,4]	1.1610	1.0910	0.9407	1.2690
[1,5]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[1,6]	1.5250	2.5440	0.9430	14.9700
[1,7]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[1,8]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[1,9]	1.4190	2.2300	0.9422	1.3580
[1,10]	1.0890	0.3524	0.9407	1.2590
[1,11]	1.1350	0.9058	0.9407	1.2650
[2,2]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[2,3]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[2,4]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[2,5]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[2,6]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[2,7]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[2,8]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[2,9]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[2,10]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[2,11]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[3,2]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[3,3]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[3,4]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[3,5]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[3,6]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[3,7]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[3,8]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[3,9]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[3,10]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[3,11]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[4,2]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580

[4,3]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[4,4]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[4,5]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[4,6]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[4,7]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[4,8]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[4,9]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[4,10]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[4,11]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[5,2]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[5,3]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[5,4]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[5,5]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[5,6]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[5,7]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[5,8]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[5,9]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[5,10]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[5,11]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[6,2]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[6,3]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[6,4]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[6,5]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[6,6]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[6,7]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[6,8]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[6,9]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[6,10]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[6,11]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[7,2]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[7,3]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[7,4]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[7,5]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[7,6]	1.0830	0.1877	0.9405	1.2590
[7,7]	1.0840	0.2180	0.9405	1.2590

[7,8]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[7,9]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[7,10]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[7,11]	1.0830	0.1928	0.9405	1.2590
[8,2]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[8,3]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[8,4]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[8,5]	1.0980	0.5096	0.9405	1.2610
[8,6]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[8,7]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[8,8]	1.1010	0.5485	0.9405	1.2610
[8,9]	1.0840	0.2167	0.9405	1.2590
[8,10]	6.3750	7.2560	0.9618	17.7500
[8,11]	16.6900	1.1100	14.5500	18.8100
[9,2]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[9,3]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[9,4]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[9,5]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[9,6]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[9,7]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[9,8]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[9,9]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[9,10]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[9,11]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[10,2]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[10,3]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[10,4]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[10,5]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[10,6]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[10,7]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[10,8]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[10,9]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[10,10]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[10,11]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[11,2]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580

[11,3]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[11,4]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[11,5]	1.0820	0.1613	0.9405	1.2590
[11,6]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[11,7]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[11,8]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[11,9]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[11,10]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[11,11]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[12,2]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[12,3]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[12,4]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[12,5]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[12,6]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[12,7]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[12,8]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[12,9]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[12,10]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[12,11]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[13,2]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[13,3]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[13,4]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[13,5]	8.9720	7.7010	0.9725	18.1300
[13,6]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[13,7]	1.0820	0.1694	0.9405	1.2590
[13,8]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[13,9]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[13,10]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[13,11]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[14,2]	16.6900	1.0830	14.5600	18.8100
[14,3]	16.6900	1.0830	14.5600	18.8100
[14,4]	16.6900	1.0830	14.5600	18.8100
[14,5]	16.6400	1.3840	14.4800	18.8000
[14,6]	16.6600	1.2520	14.5100	18.8000
[14,7]	16.6900	1.0830	14.5600	18.8100

[14,8]	3.0500	4.9970	0.9502	16.6000
[14,9]	2.5530	4.3740	0.9487	16.1400
[14,10]	16.6900	1.0830	14.5600	18.8100
[14,11]	16.6800	1.1420	14.5400	18.8100
[15,2]	1.1290	0.8371	0.9409	1.2650
[15,3]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[15,4]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[15,5]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[15,6]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[15,7]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[15,8]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[15,9]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[15,10]	1.0820	0.1364	0.9405	1.2580
[15,11]	1.0810	0.0811	0.9405	1.2580
[16,2]	16.6900	1.0830	14.5600	18.8100
[16,3]	16.6900	1.0830	14.5600	18.8100
[16,4]	16.6900	1.0830	14.5600	18.8100
[16,5]	16.6900	1.0830	14.5600	18.8100
[16,6]	16.6900	1.0830	14.5600	18.8100
[16,7]	16.6900	1.0830	14.5600	18.8100
[16,8]	4.3830	6.2260	0.9511	17.3300
[16,9]	16.6900	1.0830	14.5600	18.8100
[16,10]	16.6900	1.0830	14.5600	18.8100
[16,11]	16.6900	1.0830	14.5600	18.8100

จากตารางที่ 5 ตัวอย่างค่าเฉลี่ยของอาการผิดปกติของหัวบรรจุเครื่องตีที่ 1 ในเดือนที่ 2, 3, 4, 5,6 คือ 43.6848, 16.6900, 16.6800, 1.1610, 1.0810 และ 1.5250 ตามลำดับ

4.3 ผลการเปรียบเทียบตัวแบบ

ผลการเปรียบเทียบตัวแบบฮิดเดนมาร์คอฟ ที่นำเสนอ กับตัวแบบดั้งเดิม GEE โดยใช้เกณฑ์ ค่า MSE น้อยเป็นตัวแบบที่มีสมรรถนะสูง พบว่าค่า MSE ของตัวแบบที่นำเสนอมีค่า 3.417 ซึ่งน้อยกว่าค่า MSE ของตัวแบบ GEE ที่มีค่า 3.893 สรุปได้ว่าตัวแบบที่นำเสนอมีสมรรถนะสูงกว่า

4.4 ผลการประเมินความแม่นยำของค่าประมาณพารามิเตอร์

การประเมินความแม่นยำของค่าประมาณพารามิเตอร์โดยใช้การจำลองสถานการณ์ และใช้เกณฑ์การเอียงเฉลี่ยสัมพัทธ์ จากการสร้างข้อมูล 200 ชุด คำนวณค่า RB ได้ดังตารางที่ 4.5

Table 4.5 ค่าการเอียงเฉลี่ยสัมพัทธ์ของค่าประมาณพารามิเตอร์

Parameter	mean	Relative Bias
λ_0	0.0627	0.02
λ_1	2.6630	0.02
β_0	-5.8570	0.03
β_1	3.6220	0.04
β_2 (Correct)	0.7002	0.04
β_3 (Time)	0.7432	0.03

จากตารางที่ 5 พบว่า ค่าประมาณพารามิเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงของค่าพารามิเตอร์ ค่าการเอียงเฉลี่ยสัมพัทธ์ทุกค่ามีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าค่าประมาณพารามิเตอร์มีความแม่นยำสูง

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยเรื่อง การตรวจหาเครื่องจักรที่ผลิตสินค้าบกพร่องเพื่อวางแผนป้องกันและบำรุงรักษา โดยใช้ตัวแบบฮิดเดนมาร์คอฟ: กรณีศึกษาโรงงานผลิตเครื่องดื่ม เป็นการนำเสนอตัวแบบฮิดเดนมาร์คอฟ เพื่อใช้ตรวจหาเครื่องจักรที่ทำงานบกพร่อง และใช้ในการอธิบายผลของการแก้ไขเครื่องจักรที่ทำงานบกพร่อง และระยะเวลาในการแก้ไข ที่มีต่อความเป็นไปได้ที่เครื่องจักรนั้นจะอยู่ในสถานะ ใช้งานได้ หรือใช้งานไม่ได้ เครื่องจักรที่ทำการศึกษาคือ เครื่องจักรบรรจุเครื่องดื่มที่มีหัวบรรจุหลายหัว ตัวแปรตามคือ จำนวนครั้งของการทำงานบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องดื่ม ปัจจัยที่ศึกษาคือ การแก้ไขข้อบกพร่อง และระยะเวลาที่ใช้ในการแก้ไขข้อบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องดื่ม

5.1 สรุปผลการวิจัย

การแก้ไขข้อบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องดื่ม มีโอกาสที่หัวบรรจุเครื่องดื่มนั้นจะยังคงอยู่ในสถานะ ใช้งานไม่ได้ มากกว่าการที่ไม่ได้แก้ไขข้อบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องดื่ม อยู่ 1.4550 เท่า หมายความว่า การแก้ไขการทำงานบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องดื่ม ไม่ได้ช่วยให้หัวบรรจุเครื่องดื่มนั้นกลับมาอยู่ในสภาพใช้งานได้

การเพิ่มขึ้นของเวลาที่ใช้ในการแก้ไขข้อบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องดื่ม 1 หน่วยเวลา มีโอกาสที่หัวบรรจุเครื่องดื่มนั้นจะยังคงอยู่ในสถานะ ใช้งานไม่ได้ มากกว่าการใช้เวลาแก้ไขข้อบกพร่องเดิม อยู่ 1.4550 เท่า หมายความว่า การเพิ่มขึ้นของเวลาการแก้ไขการทำงานบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องดื่ม ไม่ได้ช่วยให้หัวบรรจุเครื่องดื่มกลับมาอยู่ในสภาพใช้งานได้

สถานะของหัวบรรจุเครื่องดื่มในเดือนปัจจุบันมีความสัมพันธ์กับสถานะของหัวบรรจุเครื่องดื่มในเดือนที่ผ่านมา หมายความว่า ถ้าเดือนที่ผ่านมาหัวบรรจุเครื่องดื่มอยู่ในสถานะ ใช้งานไม่ได้ เดือนปัจจุบันมีโอกาสดังกล่าวจะอยู่ในสถานะ ใช้งานไม่ได้ มากกว่าการที่จะเปลี่ยนมาอยู่ในสถานะ ใช้งานได้ อยู่ 1.4550 เท่า

5.2 อภิปรายผล

เป้าหมายหลักของตัวแบบฮิดเดนมาร์คอฟในการศึกษาครั้งนี้ คือการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสถานะของหัวบรรจุเครื่องดื่ม ที่มีอยู่ 2 สถานะคือ ใช้งานได้ กับ ใช้งานไม่ได้ โดยศึกษาจากจำนวนครั้งของการทำงานบกพร่องของหัวบรรจุในแต่ละเดือน ต่อเนื่องกัน ถ้าจำนวนครั้งของการทำงานบกพร่อง

มีค่ามากเกินไปปกติ หัวบรรจุเครื่องตึมนั้นมีโอกาสที่จะอยู่ในสถานะ ใช้งานไม่ได้ ในทางกลับกัน ถ้าจำนวนครั้งของการทำงานบกพร่องของหัวบรรจุมีค่าน้อยกว่าปกติ หัวบรรจุเครื่องตึมนั้นมีโอกาสที่จะอยู่ในสถานะ ใช้งานได้ โดยสถานะใช้งานได้ หรือใช้งานไม่ได้ นั้น สังเกตไม่ได้ เป็นสถานะที่ซ่อนอยู่ ค่าที่สังเกตได้คือ จำนวนครั้งของการทำงานบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องตึมแต่ละหัว โดยหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของสถานะกับ ปัจจัยที่สนใจคือ ผลของการแก้ไขข้อบกพร่อง และ เวลาที่ใช้ในการแก้ไขข้อบกพร่อง ว่าสัมพันธ์กับการเปลี่ยนสถานะของหัวบรรจุเครื่องตึมหรือไม่

ตัวแบบที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูลจำนวนครั้งของการทำงานบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องตึมแต่ละหัวโดยตรง คือตัวแบบ GEE ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยตัวแบบ GEE คือการเปลี่ยนแปลงของจำนวนครั้งของการทำงานบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องตึม สัมพันธ์กับ ผลของการแก้ไขการทำงานบกพร่อง และ เวลาที่ใช้ในการแก้ไขการทำงานบกพร่อง หรือไม่ ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวแบบที่นำเสนอ กับ ตัวแบบ GEE พบว่าตัวแบบฮิตเดนมาร์คอฟที่นำเสนอ มีสมรรถนะดีกว่าตัวแบบ GEE ดังนั้นตัวแบบฮิตเดนมาร์คอฟจึงเป็นตัวแบบที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ข้อมูลประเภทนี้

ถ้าหัวบรรจุเครื่องตึมมีการทำงานบกพร่องเป็นบางครั้ง พนักงานสามารถแก้ไขการทำงานบกพร่องนั้นได้ โดยไม่ต้องปิดเครื่องจักรซ่อมบำรุง แสดงว่าหัวบรรจุนั้นอยู่ในสถานะ ใช้งานได้ แต่ถ้าหัวบรรจุเครื่องตึมมีการทำงานบกพร่องบ่อยครั้ง แสดงว่าหัวบรรจุนั้นอยู่ในสถานะ ใช้งานไม่ได้ จำเป็นต้องหยุดเครื่องจักรเพื่อซ่อมบำรุง การแก้ไขการทำงานบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องตึม ไม่ได้ช่วยให้หัวบรรจุเครื่องตึมกลับมาอยู่ในสภาพใช้งานได้ และการเพิ่มขึ้นของเวลาการแก้ไขข้อบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องตึม ไม่ได้ช่วยให้หัวบรรจุเครื่องตึมกลับมาอยู่ในสภาพใช้งานได้ แสดงว่า การแก้ไขการทำงานบกพร่องที่เจ้าหน้าที่ปฏิบัติอยู่ ไม่สามารถแก้ปัญหที่เกิดขึ้นได้ หรืออาจเป็นเพราะว่า การทำงานบกพร่องนั้นเกี่ยวข้องกับชิ้นส่วนอื่นของเครื่องจักร สถานะของหัวบรรจุเครื่องตึมในเดือนปัจจุบันมีความสัมพันธ์กับสถานะของหัวบรรจุเครื่องตึมในเดือนที่ผ่านมา แสดงว่าหัวบรรจุเครื่องตึมถ้าอยู่ในสถานะ ใช้งานไม่ได้ใน เดือนที่ผ่านมา เดือนปัจจุบันก็มีแนวโน้มที่จะยังอยู่ในสภาพ ใช้งานไม่ได้เหมือนเดิม จึงควรมีการหยุดเครื่องจักรเพื่อซ่อมบำรุง แทนที่จะดำเนินการผลิตต่อไป ตัวแบบฮิตเดนมาร์คอฟที่นำเสนอจึงนำไปสู่การบรรลุเป้าหมายของการการตรวจหาเครื่องจักรที่ผลิตสินค้าบกพร่องเพื่อวางแผนป้องกันและบำรุงรักษา

5.3 ข้อเสนอแนะ

ตัวแบบฮิตเดนมาร์คอฟสำหรับตัวแปรตามที่เป็นจำนวนครั้งของการทำงานบกพร่องของหัวบรรจุเครื่องตึมในครั้งนี้มีสมรรถนะดีกว่าตัวแบบ GEE ดังนั้นจึงควรถูกนำมาพิจารณาใช้เป็นอันดับแรก ตัวแบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาอื่นที่มีลักษณะคล้ายกัน สามารถเพิ่มตัวแปรต้นหรือปัจจัยได้อีก หรือยืดขยายไปใช้กับข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบปัวซองพหุตัวแปร (Multivariate Poisson data) หรือข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบเบอร์นูลลี (Bernoulli distribution) คือมีค่า 0 หรือ 1

เท่านั้น และการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวแบบ สามารถใช้ค่า Deviance Information Criterion (DIC) เป็นเกณฑ์ได้ โดยตัวแบบที่มีสมรรถนะที่ดีจะมีค่า DIC น้อย อย่างไรก็ตามโปรแกรม OpenBUGS จะไม่คำนวณค่า DIC ให้ หากตัวแบบนั้นมีการแจกแจงแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete distribution) รวมอยู่ด้วย ข้อจำกัดนี้ควรแก้ไขในการวิจัยในครั้งต่อไป



บรรณานุกรม

- เฉลิมวุฒิ ไชยชนะ และสมชาย จิตตะพันธ์กุล, 2545 ทฤษฎีพื้นฐานของ Hidden Markov Model
บทความวิชาการ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- Atlas, L., M. Ostendorf, and G. D. Bernard. 2000. Hidden Markov Models for Monitoring Machining Tool Wear. Proceedings of the IEEE Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 6: 3887-3890.
- Casella, G. and E.I. George. 1992. Explaining the Gibbs Sampler. The American Statistician 46: 167-174.
- Congdon P. 2006. Bayesian Statistical Modelling, 2nd ed., John Wiley & Sons: New York, 1-56.
- Ertunc, H. M., K. A. Loparo, E. Ozdemir, and H. Ocak. 2001, Real time monitoring of tool wear using multiple modeling method, Proc. of IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, Cambridge, MA, USA, 687 – 691.
- Juang, B. H. and L. R. Rabiner. 1991. Hidden Markov models for speech recognition. Technometrics, 33(3): 251-272.
- McCullagh P and Nelder J. 1989. Generalized Linear Models, Second Edition. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC.
- Rabiner, L.R. 1989. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. Proceedings of the IEEE, 77(2): 257–286
- Robert, C.P. and Casella, G. Monte Carlo Statistical Methods, 2nd ed., Springer: New York, 2004, pp. 267-291.
- Strachan, I. G. D., D. A. Clifton, C. Sage, and D. Veselovac. 2009. A Hidden Markov Model for Condition Monitoring of a manufacturing drilling process. The Sixth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies, 803-814.

Tai, A. H., W-K Ching, L.Y. Chana. 2009. Detection of machine failure: Hidden Markov Model approach. *Computers & Industrial Engineering*, 57(2): 608–619.

Wang L, M. Mehrabi, and E. Kannatey-Asibu. 2002. Hidden Markov Model-based Tool Wear Monitoring in Turning. *J Manuf. Sci. Eng.*, 124(3).



ภาคผนวก

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ตารางผนวก 1 ค่าประมาณพารามิเตอร์

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
lambda_0	0.0751	0.07422	0.001231	-0.06135	0.07126	0.2298
lambda_1	2.738	0.0901	0.001431	2.553	2.739	2.91
beta_0	-4.928	1.301	0.0407	-8.007	-4.701	-3.202
beta_1	3.777	1.351	0.0394	1.461	3.661	6.92
beta_2	0.375	1.059	0.03745	-0.3449	0.05998	3.335
beta_3	0.5483	0.2384	0.007226	0.1348	0.5288	1.053

ตารางผนวก 2 ค่าประมาณค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งของการทำงานบกพร่อง

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
theta[1,2]	16.69	1.083	0.01629	14.56	16.69	18.81
theta[1,3]	16.68	1.178	0.01675	14.53	16.69	18.81
theta[1,4]	1.161	1.091	0.01285	0.9407	1.074	1.269
theta[1,5]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[1,6]	1.525	2.544	0.03349	0.943	1.078	14.97
theta[1,7]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[1,8]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[1,9]	1.419	2.23	0.02616	0.9422	1.077	1.358
theta[1,10]	1.089	0.3524	0.00371	0.9407	1.074	1.259
theta[1,11]	1.135	0.9058	0.01145	0.9407	1.074	1.265
theta[2,2]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[2,3]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258

ตารางผนวก 2 (ต่อ)

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
theta[2,4]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[2,5]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[2,6]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[2,7]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[2,8]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[2,9]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[2,10]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[2,11]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[3,2]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[3,3]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[3,4]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[3,5]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[3,6]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[3,7]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[3,8]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[3,9]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[3,10]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[3,11]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[4,2]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[4,3]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[4,4]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[4,5]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[4,6]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[4,7]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[4,8]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[4,9]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[4,10]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258

ตารางผนวก 2 (ต่อ)

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
theta[4,11]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[5,2]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[5,3]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[5,4]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[5,5]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[5,6]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[5,7]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[5,8]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[5,9]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[5,10]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[5,11]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[6,2]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[6,3]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[6,4]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[6,5]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[6,6]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[6,7]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[6,8]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[6,9]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[6,10]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[6,11]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[7,2]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[7,3]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[7,4]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[7,5]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[7,6]	1.083	0.1877	0.001969	0.9405	1.074	1.259

ตารางผนวก 2 (ต่อ)

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
theta[7,7]	1.084	0.218	0.003338	0.9405	1.074	1.259
theta[7,8]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[7,9]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[7,10]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[7,11]	1.083	0.1928	0.002642	0.9405	1.074	1.259
theta[8,2]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[8,3]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[8,4]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[8,5]	1.098	0.5096	0.007365	0.9405	1.074	1.261
theta[8,6]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[8,7]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[8,8]	1.101	0.5485	0.006995	0.9405	1.074	1.261
theta[8,9]	1.084	0.2167	0.001988	0.9405	1.074	1.259
theta[8,10]	6.375	7.256	0.08984	0.9618	1.146	17.75
theta[8,11]	16.69	1.11	0.01644	14.55	16.69	18.81
theta[9,2]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[9,3]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[9,4]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[9,5]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[9,6]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[9,7]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[9,8]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[9,9]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[9,10]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[9,11]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258

ตารางผนวก 2 (ต่อ)

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
theta[10,2]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[10,3]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[10,4]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[10,5]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[10,6]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[10,7]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[10,8]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[10,9]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[10,10]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[10,11]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[11,2]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[11,3]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[11,4]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[11,5]	1.082	0.1613	0.00182	0.9405	1.074	1.259
theta[11,6]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[11,7]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[11,8]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[11,9]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[11,10]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[11,11]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[12,2]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[12,3]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[12,4]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[12,5]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[12,6]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[12,7]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258

ตารางผนวก 2 (ต่อ)

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
theta[12,8]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[12,9]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[12,10]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[12,11]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[13,2]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[13,3]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[13,4]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[13,5]	8.972	7.701	0.1737	0.9725	14.44	18.13
theta[13,6]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[13,7]	1.082	0.1694	0.001908	0.9405	1.074	1.259
theta[13,8]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[13,9]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[13,10]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[13,11]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[14,2]	16.69	1.083	0.01629	14.56	16.69	18.81
theta[14,3]	16.69	1.083	0.01629	14.56	16.69	18.81
theta[14,4]	16.69	1.083	0.01629	14.56	16.69	18.81
theta[14,5]	16.64	1.384	0.02276	14.48	16.68	18.8
theta[14,6]	16.66	1.252	0.01822	14.51	16.68	18.8
theta[14,7]	16.69	1.083	0.01629	14.56	16.69	18.81
theta[14,8]	3.05	4.997	0.129	0.9502	1.094	16.6
theta[14,9]	2.553	4.374	0.1171	0.9487	1.089	16.14
theta[14,10]	16.69	1.083	0.01629	14.56	16.69	18.81
theta[14,11]	16.68	1.142	0.01672	14.54	16.69	18.81
theta[15,2]	1.129	0.8371	0.009943	0.9409	1.074	1.265

ตารางผนวก 2 (ต่อ)

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
theta[15,3]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[15,4]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[15,5]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[15,6]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[15,7]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[15,8]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[15,9]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[15,10]	1.082	0.1364	0.001594	0.9405	1.074	1.258
theta[15,11]	1.081	0.08108	0.001347	0.9405	1.074	1.258
theta[16,2]	16.69	1.083	0.01629	14.56	16.69	18.81
theta[16,3]	16.69	1.083	0.01629	14.56	16.69	18.81
theta[16,4]	16.69	1.083	0.01629	14.56	16.69	18.81
theta[16,5]	16.69	1.083	0.01629	14.56	16.69	18.81
theta[16,6]	16.69	1.083	0.01629	14.56	16.69	18.81
theta[16,7]	16.69	1.083	0.01629	14.56	16.69	18.81
theta[16,8]	4.383	6.226	0.1243	0.9511	1.107	17.33
theta[16,9]	16.69	1.083	0.01629	14.56	16.69	18.81
theta[16,10]	16.69	1.083	0.01629	14.56	16.69	18.81
theta[16,11]	16.69	1.083	0.01629	14.56	16.69	18.81

ตารางผนวก 3 ค่าประมาณความน่าจะเป็นที่จะอยู่ในสถานะ ใช้งานไม่ได้

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
mu[1,2]	0.3211	0.223	0.005811	0.01305	0.2781	0.8536
mu[1,3]	0.3441	0.2122	0.00636	0.05939	0.2951	0.8589
mu[1,4]	0.3421	0.2124	0.006372	0.05801	0.293	0.8584
mu[1,5]	0.01769	0.03838	5.18E-04	9.78E-04	0.01173	0.05357
mu[1,6]	0.01595	0.01379	3.22E-04	0.001038	0.01226	0.05216
mu[1,7]	0.02435	0.06328	8.76E-04	9.94E-04	0.01214	0.1318
mu[1,8]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[1,9]	0.01192	0.01058	2.38E-04	3.37E-04	0.009099	0.03937
mu[1,10]	0.02118	0.04748	6.46E-04	9.86E-04	0.01198	0.0793
mu[1,11]	0.01552	0.01473	3.18E-04	9.83E-04	0.01175	0.05096
mu[2,2]	0.08944	0.1327	0.001894	7.32E-04	0.02008	0.4677
mu[2,3]	0.01261	0.01104	2.49E-04	3.88E-04	0.009695	0.04122
mu[2,4]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[2,5]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[2,6]	0.0142	0.01212	2.74E-04	4.34E-04	0.01119	0.0453
mu[2,7]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[2,8]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[2,9]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[2,10]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[2,11]	0.01707	0.01411	3.22E-04	5.42E-04	0.01367	0.05273
mu[3,2]	0.1062	0.1496	0.002283	0.001646	0.02498	0.5284
mu[3,3]	0.01341	0.01158	2.62E-04	4.08E-04	0.01047	0.04312
mu[3,4]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[3,5]	0.01631	0.01399	3.26E-04	0.001099	0.01258	0.05308
mu[3,6]	0.02678	0.02013	4.61E-04	0.002665	0.02202	0.07849
mu[3,7]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[3,8]	0.01641	0.01365	3.11E-04	5.16E-04	0.01312	0.05105

ตารางผนวก 3 (ต่อ)

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
mu[3,9]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[3,10]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[3,11]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[4,2]	0.08772	0.1302	0.001723	7.60E-04	0.02007	0.4591
mu[4,3]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[4,4]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[4,5]	0.02622	0.02087	4.86E-04	8.98E-04	0.02155	0.07922
mu[4,6]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[4,7]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[4,8]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[4,9]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[4,10]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[4,11]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[5,2]	0.08827	0.132	0.001842	7.49E-04	0.02	0.4615
mu[5,3]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[5,4]	0.01665	0.01382	3.15E-04	5.29E-04	0.01336	0.05163
mu[5,5]	0.01784	0.01487	3.46E-04	0.001334	0.01397	0.05662
mu[5,6]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[5,7]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[5,8]	0.01386	0.01189	2.69E-04	4.25E-04	0.01087	0.04448
mu[5,9]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[5,10]	0.01609	0.01343	3.06E-04	5.04E-04	0.01284	0.05034
mu[5,11]	0.01801	0.01496	3.48E-04	0.001353	0.01412	0.05704
mu[6,2]	0.0887	0.132	0.001675	7.28E-04	0.01991	0.4668
mu[6,3]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[6,4]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909

ตารางผนวก 3 (ต่อ)

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
mu[6,5]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[6,6]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[6,7]	0.02704	0.02028	4.64E-04	0.002717	0.02222	0.07909
mu[6,8]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[6,9]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[6,10]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[6,11]	0.01972	0.01595	3.70E-04	0.00159	0.01563	0.06074
mu[7,2]	0.1056	0.151	0.002153	0.001777	0.02431	0.5278
mu[7,3]	0.01232	0.01085	2.44E-04	3.67E-04	0.009448	0.04052
mu[7,4]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[7,5]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[7,6]	0.04075	0.02915	6.57E-04	0.005038	0.03401	0.1143
mu[7,7]	0.01947	0.01588	3.66E-04	0.001546	0.0154	0.06016
mu[7,8]	0.01537	0.01391	3.15E-04	9.78E-04	0.01168	0.0506
mu[7,9]	0.03268	0.02602	6.12E-04	0.001189	0.02686	0.09855
mu[7,10]	0.14	0.1058	0.002271	0.01608	0.1124	0.42
mu[7,11]	0.09884	0.07364	0.001595	0.01238	0.08112	0.2904
mu[8,2]	0.09324	0.137	0.001754	8.27E-04	0.02149	0.4791
mu[8,3]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[8,4]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[8,5]	0.07417	0.06326	0.00148	0.002367	0.05928	0.2397
mu[8,6]	0.01858	0.01859	3.79E-04	0.00138	0.01435	0.05808
mu[8,7]	0.02469	0.01887	4.34E-04	0.002308	0.02016	0.07293
mu[8,8]	0.07881	0.05772	0.001263	0.01051	0.06525	0.2298
mu[8,9]	0.02182	0.02257	4.28E-04	0.001843	0.01706	0.06564

ตารางผนวก 3 (ต่อ)

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
mu[8,10]	0.04045	0.02998	6.61E-04	0.004947	0.0336	0.1133
mu[8,11]	0.4029	0.3387	0.00463	0.02747	0.2361	0.965
mu[9,2]	0.1067	0.15	0.002303	0.001598	0.02521	0.5251
mu[9,3]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[9,4]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[9,5]	0.01255	0.011	2.48E-04	3.85E-04	0.009641	0.04108
mu[9,6]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[9,7]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[9,8]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[9,9]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[9,10]	0.01261	0.01104	2.49E-04	3.88E-04	0.009695	0.04122
mu[9,11]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[10,2]	0.08856	0.1315	0.001747	7.61E-04	0.01999	0.4597
mu[10,3]	0.01291	0.01125	2.54E-04	4.01E-04	0.009984	0.04191
mu[10,4]	0.01261	0.01104	2.49E-04	3.88E-04	0.009695	0.04122
mu[10,5]	0.01541	0.01295	2.94E-04	4.90E-04	0.01224	0.04851
mu[10,6]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[10,7]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[10,8]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[10,9]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[10,10]	0.01279	0.01116	2.52E-04	3.93E-04	0.009867	0.04167
mu[10,11]	0.01322	0.01145	2.59E-04	4.06E-04	0.01029	0.04266
mu[11,2]	0.09785	0.1404	0.00192	8.72E-04	0.02289	0.4875
mu[11,3]	0.02866	0.02128	4.86E-04	0.003024	0.02368	0.08319
mu[11,4]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[11,5]	0.01811	0.01484	3.40E-04	5.62E-04	0.0146	0.05553
mu[11,6]	0.01671	0.01447	3.27E-04	0.001165	0.01292	0.05403

ตารางผนวก 3 (ต่อ)

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
mu[11,7]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[11,8]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[11,9]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[11,10]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[11,11]	0.01556	0.01305	2.97E-04	4.95E-04	0.01239	0.04879
mu[12,2]	0.0913	0.1355	0.001694	7.61E-04	0.02052	0.4753
mu[12,3]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[12,4]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[12,5]	0.01406	0.01203	2.72E-04	4.30E-04	0.01105	0.04498
mu[12,6]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[12,7]	0.01181	0.01051	2.37E-04	3.33E-04	0.009006	0.03909
mu[12,8]	0.01406	0.01203	2.72E-04	4.30E-04	0.01105	0.04498
mu[12,9]	0.03223	0.02352	5.35E-04	0.003651	0.02676	0.09165
mu[12,10]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[12,11]	0.02147	0.01728	3.99E-04	7.30E-04	0.01743	0.06508
mu[13,2]	0.1738	0.2162	0.003673	0.005575	0.04868	0.682
mu[13,3]	0.06371	0.04593	0.001015	0.008378	0.05315	0.1815
mu[13,4]	0.02124	0.01683	3.89E-04	0.001825	0.01696	0.06477
mu[13,5]	0.8083	0.2553	0.007076	0.09717	0.9332	0.9998
mu[13,6]	0.1894	0.1986	0.003856	0.004475	0.1023	0.6493
mu[13,7]	0.2931	0.2044	0.004675	0.02718	0.2456	0.7823
mu[13,8]	0.01576	0.01377	3.19E-04	0.001011	0.01206	0.05167
mu[13,9]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[13,10]	0.03116	0.02478	5.82E-04	0.001115	0.02556	0.09421
mu[13,11]	0.03685	0.02653	6.00E-04	0.004419	0.03079	0.1041
mu[14,2]	0.8406	0.2244	0.003545	0.2054	0.9526	0.9995
mu[14,3]	0.9966	0.01633	2.92E-04	0.9705	0.9999	1

ตารางผนวก 3 (ต่อ)

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
mu[14,4]	0.9471	0.05654	0.001169	0.7884	0.9657	0.9989
mu[14,5]	0.9105	0.07591	0.001595	0.7106	0.9306	0.9952
mu[14,6]	0.959	0.0552	0.001031	0.8156	0.9773	0.9995
mu[14,7]	0.9827	0.03548	6.56E-04	0.8915	0.9945	1
mu[14,8]	0.7908	0.1214	0.002796	0.5148	0.8074	0.9737
mu[14,9]	0.452	0.2924	0.007091	0.04982	0.3872	0.9948
mu[14,10]	0.6478	0.2863	0.006895	0.08283	0.705	0.9994
mu[14,11]	0.7869	0.1227	0.002834	0.509	0.8032	0.9719
mu[15,2]	0.2017	0.2438	0.004647	0.008487	0.06781	0.7596
mu[15,3]	0.02624	0.02937	5.28E-04	0.002377	0.02055	0.07662
mu[15,4]	0.03207	0.02342	5.32E-04	0.00362	0.02663	0.09127
mu[15,5]	0.01533	0.01344	3.14E-04	9.78E-04	0.01168	0.05048
mu[15,6]	0.01767	0.01453	3.32E-04	5.53E-04	0.01422	0.05433
mu[15,7]	0.02205	0.0173	3.99E-04	0.001977	0.01776	0.0668
mu[15,8]	0.0191	0.01559	3.62E-04	0.001496	0.01511	0.05931
mu[15,9]	0.01511	0.01275	2.89E-04	4.83E-04	0.01197	0.0478
mu[15,10]	0.04896	0.03492	7.81E-04	0.006225	0.0408	0.1375
mu[15,11]	0.01661	0.01417	3.30E-04	0.001154	0.01283	0.0538
mu[16,2]	0.5749	0.2481	0.00412	0.04102	0.6256	0.9359
mu[16,3]	0.7853	0.1232	0.00285	0.5059	0.8016	0.9717
mu[16,4]	0.7511	0.1335	0.003173	0.4595	0.7656	0.9648
mu[16,5]	0.7149	0.1436	0.003505	0.4086	0.7277	0.9551
mu[16,6]	0.9313	0.06549	0.001363	0.7506	0.9509	0.9976
mu[16,7]	0.9864	0.02766	5.44E-04	0.9076	0.9963	1
mu[16,8]	0.5401	0.1844	0.005006	0.2088	0.5307	0.9113
mu[16,9]	0.2315	0.3061	0.006659	0.01493	0.07811	0.9399
mu[16,10]	0.5783	0.1765	0.004689	0.2474	0.5753	0.9218

ตารางผนวก 3 (ต่อ)

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
mu[16,11]	0.8829	0.0882	0.001885	0.6624	0.9026	0.992

ตารางผนวก 4 ผลต่างของค่าเฉลี่ยกับค่าจริงของข้อมูล

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
E[1,2]	-6.691	1.083	0.01629	-8.809	-6.687	-4.556
E[1,3]	-7.677	1.178	0.01675	-9.809	-7.685	-5.533
E[1,4]	2.839	1.091	0.01285	2.731	2.926	3.059
E[1,5]	0.919	0.08108	0.001347	0.7417	0.9261	1.06
E[1,6]	4.475	2.544	0.03349	-8.973	4.922	5.057
E[1,7]	0.919	0.08108	0.001347	0.7417	0.9261	1.06
E[1,8]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[1,9]	4.581	2.23	0.02616	4.644	4.923	5.058
E[1,10]	2.911	0.3524	0.00371	2.741	2.926	3.059
E[1,11]	3.865	0.9058	0.01145	3.735	3.926	4.059
E[2,2]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[2,3]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[2,4]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[2,5]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[2,6]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[2,7]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[2,8]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[2,9]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[2,10]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[2,11]	0.919	0.08108	0.001347	0.7417	0.9261	1.06
E[3,2]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404

ตารางผนวก 4 (ต่อ)

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
E[3,3]	0.919	0.08108	0.001347	0.7417	0.9261	1.06
E[3,4]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[3,5]	0.919	0.08108	0.001347	0.7417	0.9261	1.06
E[3,6]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[3,7]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[3,8]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[3,9]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[3,10]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[3,11]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[4,2]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[4,3]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[4,4]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[4,5]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[4,6]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[4,7]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[4,8]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[4,9]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[4,10]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[4,11]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[5,2]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[5,3]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[5,4]	0.919	0.08108	0.001347	0.7417	0.9261	1.06
E[5,5]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[5,6]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[5,7]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[5,8]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[5,9]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404

ตารางผนวก 4 (ต่อ)

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
E[5,10]	0.919	0.08108	0.001347	0.7417	0.9261	1.06
E[5,11]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[6,2]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[6,3]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[6,4]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[6,5]	0.919	0.08108	0.001347	0.7417	0.9261	1.06
E[6,6]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[6,7]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[6,8]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[6,9]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[6,10]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[6,11]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[7,2]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[7,3]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[7,4]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[7,5]	1.919	0.08108	0.001347	1.742	1.926	2.06
E[7,6]	2.917	0.1877	0.001969	2.741	2.926	3.06
E[7,7]	0.9162	0.218	0.003338	0.7414	0.9261	1.06
E[7,8]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[7,9]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[7,10]	1.919	0.08108	0.001347	1.742	1.926	2.06
E[7,11]	1.917	0.1928	0.002642	1.741	1.926	2.06
E[8,2]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[8,3]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[8,4]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[8,5]	2.902	0.5096	0.007365	2.74	2.926	3.06
E[8,6]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958

ตารางผนวก 4 (ต่อ)

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
E[8,7]	0.919	0.08108	0.001347	0.7417	0.9261	1.06
E[8,8]	2.899	0.5485	0.006995	2.739	2.926	3.06
E[8,9]	1.916	0.2167	0.001988	1.741	1.926	2.06
E[8,10]	-0.3746	7.256	0.08984	-11.75	4.854	5.038
E[8,11]	-6.687	1.11	0.01644	-8.809	-6.686	-4.547
E[9,2]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[9,3]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[9,4]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[9,5]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[9,6]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[9,7]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[9,8]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[9,9]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[9,10]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[9,11]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[10,2]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[10,3]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[10,4]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[10,5]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[10,6]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[10,7]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[10,8]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[10,9]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[10,10]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[10,11]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[11,2]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[11,3]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958

ตารางผนวก 4 (ต่อ)

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
E[11,4]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[11,5]	1.918	0.1613	0.00182	1.742	1.926	2.06
E[11,6]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[11,7]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[11,8]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[11,9]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[11,10]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[11,11]	1.919	0.08108	0.001347	1.742	1.926	2.06
E[12,2]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[12,3]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[12,4]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[12,5]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[12,6]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[12,7]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[12,8]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[12,9]	1.919	0.08108	0.001347	1.742	1.926	2.06
E[12,10]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[12,11]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[13,2]	0.919	0.08108	0.001347	0.7417	0.9261	1.06
E[13,3]	0.919	0.08108	0.001347	0.7417	0.9261	1.06
E[13,4]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[13,5]	-3.972	7.701	0.1737	-13.13	-9.437	4.028
E[13,6]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[13,7]	0.9175	0.1694	0.001908	0.7415	0.9261	1.06
E[13,8]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[13,9]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[13,10]	0.919	0.08108	0.001347	0.7417	0.9261	1.06

ตารางผนวก 4 (ต่อ)

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
E[13,11]	0.919	0.08108	0.001347	0.7417	0.9261	1.06
E[14,2]	-5.691	1.083	0.01629	-7.809	-5.687	-3.556
E[14,3]	-3.691	1.083	0.01629	-5.809	-3.687	-1.556
E[14,4]	-5.691	1.083	0.01629	-7.809	-5.687	-3.556
E[14,5]	-9.639	1.384	0.02276	-11.8	-9.68	-7.482
E[14,6]	-9.663	1.252	0.01822	-11.8	-9.683	-7.513
E[14,7]	-4.691	1.083	0.01629	-6.809	-4.687	-2.556
E[14,8]	1.95	4.997	0.129	-11.6	3.906	4.05
E[14,9]	1.447	4.374	0.1171	-12.13	2.911	3.051
E[14,10]	-4.691	1.083	0.01629	-6.809	-4.687	-2.556
E[14,11]	-8.682	1.142	0.01672	-10.81	-8.686	-6.539
E[15,2]	2.871	0.8371	0.009943	2.735	2.926	3.059
E[15,3]	0.919	0.08108	0.001347	0.7417	0.9261	1.06
E[15,4]	1.919	0.08108	0.001347	1.742	1.926	2.06
E[15,5]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[15,6]	0.919	0.08108	0.001347	0.7417	0.9261	1.06
E[15,7]	0.919	0.08108	0.001347	0.7417	0.9261	1.06
E[15,8]	-1.081	0.08108	0.001347	-1.258	-1.074	-0.9404
E[15,9]	-0.08098	0.08108	0.001347	-0.2583	-0.07385	0.05958
E[15,10]	1.918	0.1364	0.001594	1.742	1.926	2.06
E[15,11]	0.919	0.08108	0.001347	0.7417	0.9261	1.06
E[16,2]	3.309	1.083	0.01629	1.191	3.313	5.444
E[16,3]	10.31	1.083	0.01629	8.191	10.31	12.44
E[16,4]	16.31	1.083	0.01629	14.19	16.31	18.44
E[16,5]	10.31	1.083	0.01629	8.191	10.31	12.44
E[16,6]	26.31	1.083	0.01629	24.19	26.31	28.44
E[16,7]	9.309	1.083	0.01629	7.191	9.313	11.44

ตารางผนวก 4 (ต่อ)

	mean	sd	MC_error	val2.5pc	median	val97.5pc
E[16,8]	-0.3828	6.226	0.1243	-13.33	2.893	3.049
E[16,9]	0.3093	1.083	0.01629	-1.809	0.3129	2.444
E[16,10]	-0.6907	1.083	0.01629	-2.809	-0.6871	1.444
E[16,11]	14.31	1.083	0.01629	12.19	14.31	16.44



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล: นายพิชญ์ ทองขาว

(Mr. Pitsanu Tongkhaw)

ตำแหน่ง: อาจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

การศึกษา: วศ.ด. (วิศวกรรมอุตสาหการ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชื่อ-สกุล: นางศรีวิไล พวงน้อย

(Mrs.Srivilai Phuaknuy)

ตำแหน่ง: อาจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ

การศึกษา: ศษ.บ คณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ชื่อ-สกุล: นายบรรพต ขุนจันทร์

(Mr. Bunpot Khuncechan)

ตำแหน่ง: อาจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาผลิตเครื่องมือและแม่พิมพ์

การศึกษา: วศ.ม (การจัดการอุตสาหการ)

