

แบบจำลองนิวรอนและสถาปัตยกรรมเครือข่าย (neuron model and network architectures)

1. แบบจำลองนิวรอน (neuron model)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ความหมายและคำจำกัดความของระบบประสาททางชีววิทยา และเครือข่ายประสาทเทียมมีความเกี่ยวข้องกันอย่างไร ต่อไปนี้จะอธิบายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของนิวรอน และอธิบายลักษณะการเชื่อมต่อกันของนิวรอนต่าง ๆ

เครือข่ายประสาทเทียมมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในหลายสาขาวิชา เช่น วิศวกรรม ฟิสิกส์ จิตวิทยา และคณิตศาสตร์ เป็นต้น ทำให้งานวิจัยหรือหนังสือที่มีการตีพิมพ์เรื่องใช้ตัวแปรที่แตกต่างกัน ประกอบกันเป็นเรื่องที่ค่อนข้างใหม่ จึงยังไม่มีข้อกำหนดสัญลักษณ์ที่เป็นมาตรฐาน ให้มีรูปแบบเดียวกัน ดังนั้นเพื่อให้มีความเข้าใจอันเดียวกัน ได้กำหนดความหมายของสัญลักษณ์ต่าง ๆ ไว้ดังนี้

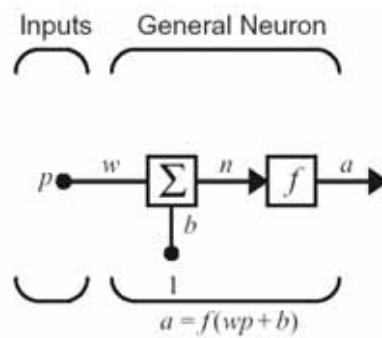
สเกลาร์ (Scalars) ใช้อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็ก ตัวเอียง

เวกเตอร์ (Vectors) ใช้อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็ก ตัวหนา

เมตริกซ์ (Matrices) ใช้อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ ตัวหนา

1.1 หนึ่งอินพุตนิวรอน (Single-Input Neuron)

ค่าสเกลาร์อินพุต (input) p คูณกับค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) w จะได้อยู่ในรูปของ wp แล้วอีกส่วนหนึ่งคืออินพุตที่มีค่าเท่ากับ 1 คูณกับไบแอส (bias) b ค่าเหล่านี้ได้นำมารวมกันเป็นค่าเอาต์พุตสุทธิ (net output) n และส่งเข้าไปในฟังก์ชันส่งผ่าน (transfer function) f ทำให้ได้ค่าเอาต์พุต (output) a ออกมา ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 หนึ่งอินพุตนิวรอน

ที่มา: Martin *et al.* (1996)

ผลรวมนิวรอนคำนวณได้จากสมการที่ 10

$$a = f(wp + b) \quad (10)$$

ค่าเอาต์พุตที่แท้จริงขึ้นอยู่กับฟังก์ชันส่งผ่านที่เลือกใช้ ไซแนปส์มีลักษณะเหมือนกันกับค่าถ่วงน้ำหนักต่างกันตรงที่ค่าอินพุตของไซแนปส์มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งค่าไซแนปส์นี้หากไม่ต้องการก็สามารถละทิ้งได้

ค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไซแนปส์สามารถปรับค่าได้ โดยปกติผู้ออกแบบเครือข่ายจะเป็นผู้เลือกค่าเริ่มต้นและเลือกฟังก์ชันส่งผ่าน แล้วค่าถ่วงน้ำหนักและไซแนปส์จะถูกปรับโดย learning rule

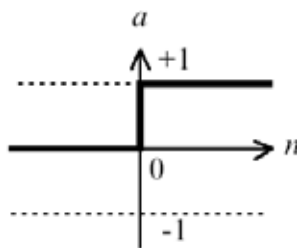
1.2 ฟังก์ชันส่งผ่าน (transfer function)

ฟังก์ชันส่งผ่าน ดังแสดงในภาพที่ 20 อาจจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น (linear) หรือไม่เชิงเส้น (non-linear) ก็ได้ แต่สิ่งสำคัญอยู่ที่ว่าฟังก์ชันที่เลือกต้องมีความเหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหา นั้น โดยฟังก์ชันส่งผ่านนั้นที่ใช้กันอยู่มีหลายแบบด้วยกัน แต่แบบที่ใช้กันโดยปกติแล้วจะมี 3 แบบ

1.2.1 ฟังก์ชันฮาร์ดลิมิต (hard limit transfer function)

ฟังก์ชันฮาร์ดลิมิต เป็นฟังก์ชันส่งผ่านที่แยกประเภทตัวแปรนำออกออกเป็น 2 ประเภทที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน มีค่าตัวแปรนำออกที่เป็น 0 เมื่อตัวแปรนำเข้ามีค่าน้อยกว่า 0 และตัวแปรนำออกมีค่าเป็น 1 เมื่อตัวแปรนำเข้ามีค่ามากกว่า 0 เมื่อตัวแปรนำเข้ามีค่ามากกว่า 0 (ดังแสดงในสมการที่ 11) ภาพที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินพุตและเอาต์พุตดังนี้

$$\begin{aligned} a &= 0 && \text{เมื่อ } n < 0 \\ a &= 1 && \text{เมื่อ } n \geq 0 \end{aligned} \tag{11}$$



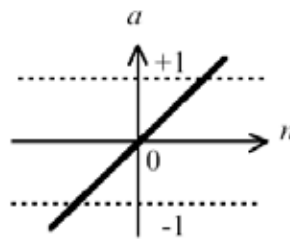
ภาพที่ 21 ฟังก์ชันฮาร์ดลิมิต

ที่มา: Martin *et al.* (1996)

1.2.2 ฟังก์ชันลิเนียร์ (linear transfer function)

ฟังก์ชันลิเนียร์เป็นฟังก์ชันส่งผ่านที่มีความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุตเป็นเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 22 ซึ่งค่าตัวแปรที่ได้จะมีค่าเท่ากับค่าของอินพุต ดังสมการที่ 12

$$a = n \quad (12)$$



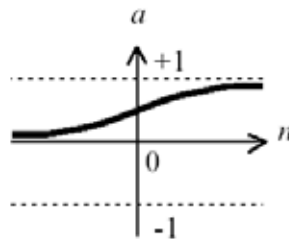
ภาพที่ 22 ฟังก์ชันลิเนียร์

ที่มา: Martin *et al.* (1996)

1.2.3 ฟังก์ชันซิกมอยด์ (sigmoid transfer function)

ฟังก์ชันซิกมอยด์เป็นฟังก์ชันส่งผ่านที่ใช้กับค่าอินพุตในช่วงระหว่าง $-\alpha$ ถึง α และจะให้เอาต์พุตในช่วง 0 ถึง 1 ดังสมการที่ 13 จะนิยมใช้ในการออกแบบ เครือข่ายประสาทเทียมที่มีหลายชั้น (multilayer network) ซึ่งใช้ฝึกหัด (train) กับวิธีแพร่ย้อนกลับ (backpropagation algorithm) เนื่องจากเป็นฟังก์ชันที่สามารถหาอนุพันธ์ได้ (differentiable) โดยฟังก์ชันนี้มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 23

$$a = \frac{1}{1 + e^{-n}} \quad (13)$$

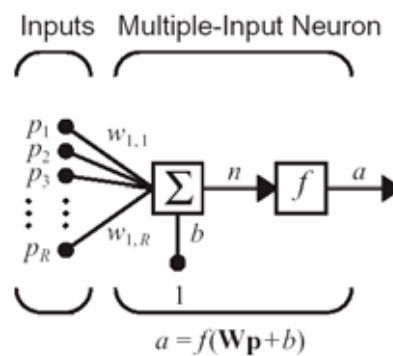


ภาพที่ 23 ฟังก์ชันส่งผ่านแบบซิกมอยด์

ที่มา: Martin *et al.* (1996)

1.3 มัลติอินพุตนิวรอน (multiple-input neuron)

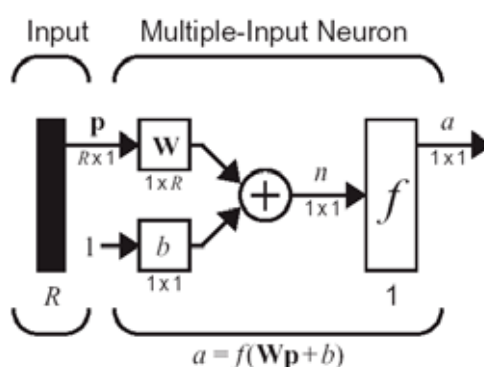
ในเครือข่ายประสาทเทียมปกตินั้น มักจะมีอินพุตมากกว่า 1 ตัว ในที่นี้กำหนดให้เป็น R อินพุต ดังแสดงในภาพที่ 24 แต่ละอินพุต $p_1 p_2 \dots p_R$ จะถ่วงน้ำหนักด้วย $w_{1,1} w_{1,2} \dots w_{1,R}$ ของเมตริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนัก (weight matrix) $\mathbf{W}$



ภาพที่ 24 มัลติอินพุตนิวรอน

ที่มา: Martin *et al.* (1996)

การกำหนดดัชนีค่าถ่วงน้ำหนัก (weight indices) แต่ละหน่วย (element) ของเมตริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนัก ดัชนีตัวแรก คือ นิวรอนปลายทาง (neuron destination) ดัชนีตัวที่สอง คือ ตำแหน่งของอินพุตที่ส่งเข้าไปในนิวรอน ดังนั้น $w_{i,2}$ หมายความว่า ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมต่อระหว่างนิวรอนตัวที่ 1 กับอินพุตตัวที่ 2 เราสามารถที่จะเขียนเครือข่ายที่มีนิวรอนและอินพุตหลาย ๆ ตัว นอกจากนี้ยังสามารถเขียนเครือข่ายได้มากกว่า 1 ชั้น (layer) เพื่อความสะดวกในการเขียนอาจเขียนย่อได้ดังแสดงในภาพที่ 25



ภาพที่ 25 การเขียนโดยย่อของนิวรอนที่มี R อินพุต

ที่มา: Martin *et al.* (1996)

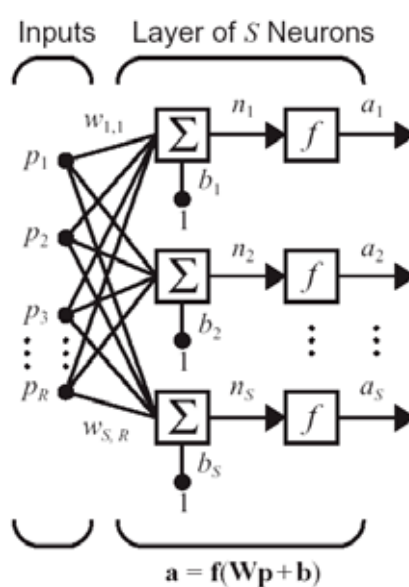
ภาพที่ 25 แสดงให้เห็นว่าเวกเตอร์อินพุต (input vector) p เป็นแท่งสี่เหลี่ยมทางด้านซ้าย มิติของเวกเตอร์ p แสดงด้านล่างของตัวแปร คือ $R \times 1$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า อินพุต เป็น single vector ที่ประกอบด้วย R หน่วย (elements) อินพุตเหล่านั้นจะเข้าไปสู่เมตริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนักซึ่งมี R คอลัมน์ 1 แถว (ในกรณีมี 1 นิวรอน) ค่าคงที่ 1 ซึ่งคล้ายกับค่าอินพุตนำไปคูณกับค่าไบแอส ผลรวมของอินพุตสุทธิ ถูกส่งไปยังฟังก์ชันส่งผ่าน f ซึ่งก็คือ n (ผลรวมของ wp และ b) ในกรณีนี้ เอาท์พุต a เป็นค่าสเกลาร์ แต่ถ้าในกรณีที่มีมากกว่า 1 นิวรอน ค่าเอาท์พุตก็จะเป็นเวกเตอร์

2. สถาปัตยกรรมเครือข่าย (network architectures)

โดยปกติเครือข่ายที่มี 1 นิวรอน แต่มีอินพุตหลายอินพุต อาจจะไม่เพียงพอ อาจต้องใช้ นิวรอนเพิ่มมากขึ้น ทำงานขนานกันไป ซึ่งเรียกแหล่งที่รวมนิวรอนเหล่านี้ว่า ชั้น (layer) รายละเอียดเกี่ยวกับชั้นของเครือข่ายประสาทเทียมสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.1 นิวรอนชั้นเดียว (a layer of neurons)

เครือข่ายชั้นเดียว (single-layer network) ซึ่งมี S นิวรอน ดังแสดงในภาพที่ 26 แต่ละอินพุต (มี R อินพุต) ซึ่งเชื่อมต่อกับนิวรอนและเมตริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนัก ซึ่งในกรณีนี้มี S แถว



ภาพที่ 26 เครือข่ายที่มี 1 ชั้น S นิวรอน

ที่มา: Martin *et al.* (1996)

ในแต่ละชั้นประกอบด้วย เมตริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนัก $\mathbf{W}$ ผลรวมไบแอสเวกเตอร์ $\mathbf{b}$ ฟังก์ชันส่งผ่าน และเอาต์พุตเวกเตอร์ $\mathbf{a}$

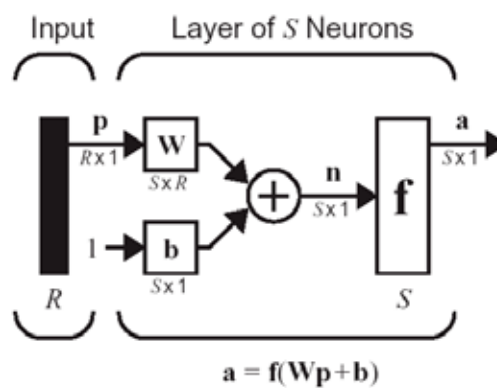
ในแต่ละหน่วยของอินพุตเวกเตอร์ $\mathbf{p}$ ถูกเชื่อมต่อกับนิวรอนแต่ละตัวตลอดทั้ง เมตริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนัก $\mathbf{W}$ แต่ละนิวรอนจะมีไบแอส b_i ค่าผลรวม 1 ค่า ฟังก์ชันส่งผ่าน f 1 แบบ และเอาต์พุต a_i ซึ่งเมื่อเอาต์พุตทั้งหมดที่ออกมาจากชั้นจะมีลักษณะเป็นเวกเตอร์ $\mathbf{a}$

โดยทั่วไปแล้วจำนวนอินพุตจะแตกต่างจากจำนวนนิวรอน นั่นคือ $R \neq S$ และในแต่ละชั้นก็ไม่จำเป็นต้องมีฟังก์ชันส่งผ่านเหมือนกันด้วย ผู้ออกแบบสามารถกำหนดให้แตกต่างกันก็ได้

หน่วยของอินพุตเวกเตอร์ (elements of input vector) ที่เข้าในเครือข่ายตลอดทั้งเมตริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนัก ซึ่งดังแสดงในสมการที่ 14

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \dots & w_{1,R} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \dots & w_{2,R} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{S,1} & w_{S,2} & \dots & w_{S,R} \end{bmatrix} \quad (14)$$

เพื่อความสะดวกในการเขียนเครือข่ายที่มี S นิวรอน R อินพุต (เครือข่าย 1 ชั้น) ดังแสดงในภาพที่ 27 สัญลักษณ์ได้ตัวแปรบอกให้รู้ว่า $\mathbf{p}$ เป็นเวกเตอร์ที่มีความยาว (length) R $\mathbf{W}$ เป็นเมตริกซ์มิติ $S \times R$ $\mathbf{a}$ และ $\mathbf{b}$ เป็นเวกเตอร์ที่มีความยาว S

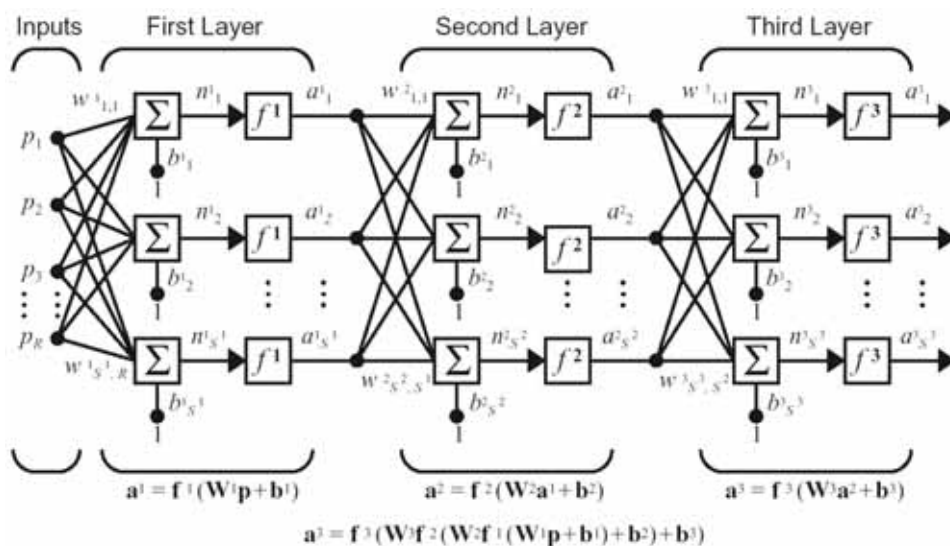


ภาพที่ 27 การเขียนโดยย่อของเครือข่ายที่มี 1 ชั้น S นิวรอน

ที่มา: Martin *et al.* (1996)

2.2 นิวรอนหลายชั้น (multi layers neurons)

เมื่อพิจารณาเครือข่ายที่มีหลายชั้น พบแต่ละชั้นมีเมตริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนัก W และไบแอสเวกเตอร์ b ของแต่ละชั้น เอาท์พุตสุทธิเวกเตอร์ n และเอาท์พุตเวกเตอร์ a ของแต่ละชั้น เพื่อแสดงให้เห็นความชัดเจนในแต่ละชั้น จึงได้กำหนดสัญลักษณ์ ด้วยยก (superscript) เช่น W^1 หมายถึง เป็นเมตริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนักของชั้นที่ 1 W^2 หมายถึง เป็นเมตริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนักของชั้นที่ 2 ภาพที่ 28 แสดงให้เห็นการเขียนเครือข่ายที่มี 3 ชั้น



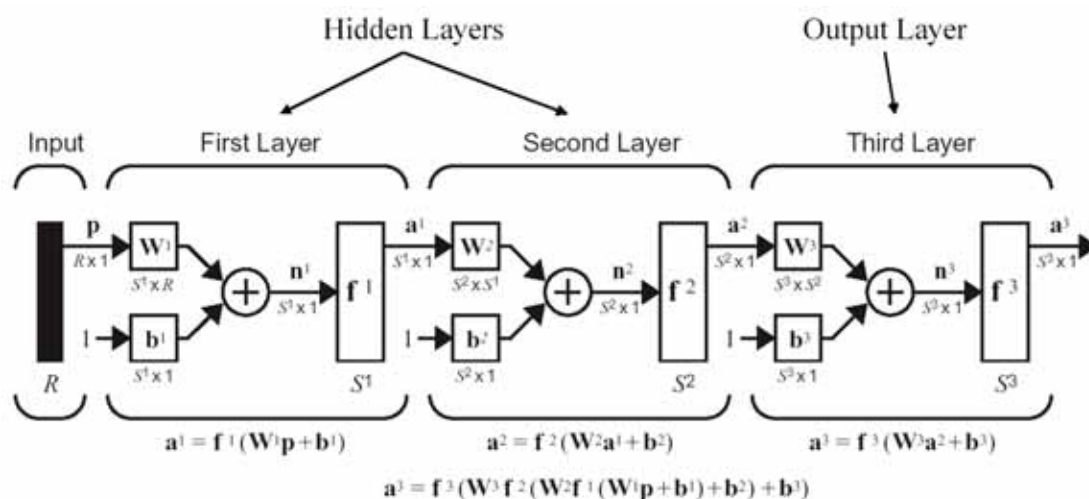
ภาพที่ 28 เครือข่าย 3 ชั้น

ที่มา: Martin *et al.* (1996)

ดังแสดงในภาพที่ 28 เครือข่ายมี R อินพุต S' นิวรอน ในชั้นแรก S' นิวรอน ในชั้นที่ 3 ในแต่ละชั้นสามารถกำหนดจำนวนนิวรอนให้แตกต่างกันได้ ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบเครือข่าย

เอาท์พุตของชั้น 1 และ 2 จะเป็นอินพุตของชั้นที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ดังนั้นชั้นที่ 2 สามารถเขียนเป็นเครือข่ายชั้นเดียว ที่มี $R = S'$ อินพุต $S = S'$ นิวรอน และ $S' = S'$ นิวรอน และเมตริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนักก็จะเป็น W^2 ส่วนอินพุตในชั้นที่ 2 ก็จะเป็น a^1 และเอาท์พุตจะเป็น a^2

ชั้นสุดท้ายของเครือข่ายจะเป็นชั้นเอาต์พุต (output layer) ส่วนชั้นอื่นจะเรียกว่า ชั้นซ่อน (hidden layers) เครือข่ายในภาพที่ 28 มีชั้นเอาต์พุตในชั้นที่ 3 และมีชั้นซ่อน 2 ชั้น สามารถเขียนโดยย่อได้ดังแสดงในภาพที่ 29



ภาพที่ 29 การเขียนโดยย่อของเครือข่าย 3 ชั้น

ที่มา: Martin *et al.* (1996)

เครือข่ายหลายชั้น (multilayer networks) เป็นเครือข่ายที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า เครือข่ายชั้นเดียว ตัวอย่างเช่น เครือข่าย 2 ชั้น ที่มีฟังก์ชันส่งผ่านชั้นที่ 1 เป็นแบบซิกมอยด์ และ ชั้นที่ 2 เป็นลิเนียร์ สามารถฝึกหัดให้เลียนแบบฟังก์ชันต่าง ๆ ได้ดี ในขณะที่เครือข่ายชั้นเดียว ไม่สามารถทำได้

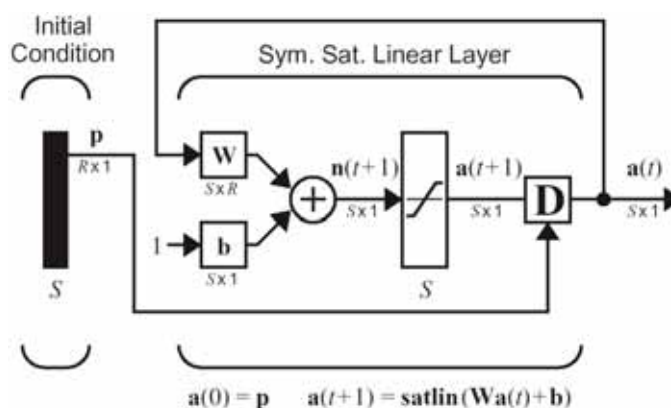
การออกแบบเครือข่ายให้มีสถาปัตยกรรมต่าง ๆ นั้น สามารถกำหนดได้หลายรูปแบบ ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาในการเลือกใช้งานได้ สามารถให้หลักการต่อไปนี้ในการพิจารณาได้

ขั้นเริ่มต้นให้สำรวจจำนวน อินพุตหรือตัวแปรนำเข้าที่ใช้ สามารถที่จะพิจารณาได้จากปัญหา ภายนอก (external problem) สมมติว่า มีตัวแปรจากภายนอก 4 ตัว ก็หมายความว่าต้องใช้อินพุต 4 อินพุตในเครือข่าย ในทำนองเดียวกัน ถ้ามี เอาต์พุตหรือตัวแปรนำออกจากเครือข่าย แสดงว่า จะต้องมีการเลือกฟังก์ชันส่งผ่านของชั้นเอาต์พุต ถ้าค่าเอาต์พุต ออกมา มีค่าระหว่าง -1 และ 1 ควรเลือกฟังก์ชันส่งผ่านแบบสมมาตรฮาร์ลิมิต ดังนั้น สถาปัตยกรรม ของเครือข่ายชั้นเดียวจะถูกกำหนดอย่างสมบูรณ์โดยตัวปัญหา ซึ่งก็หมายถึงจำนวน อินพุต เอาต์พุต และฟังก์ชันส่งผ่าน

ในกรณีที่มีมากกว่า 2 ชั้น ปัญหาภายนอกก็ไม่สามารถบอกได้ว่าจำนวนนิวรอนที่ต้องการในชั้นซ่อนเป็นจำนวนเท่าไรจะเหมาะสม ซึ่งปัญหานี้ก็ได้รับความสนใจในงานวิจัยด้านเครือข่ายประสาทเทียม นอกจากนี้ปัญหจำนวนชั้นที่เหมาะสมนั้น โดยส่วนใหญ่จำนวนชั้นในทางปฏิบัติที่ใช้กันอยู่ มีเพียง 2-3 ชั้นเท่านั้น ที่มีมากกว่า 4 ชั้นแทบจะไม่มีการใช้กัน ส่วนไบแอสนั้นจะมีการเลือกใช้หรือไม่ขึ้นขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบ แต่ถ้ามีการใช้ก็ทำให้เครือข่ายมีประสิทธิภาพมากกว่า (Martin *et al.*, 1996)

2.3 เครือข่ายแบบรีเคอร์เรนต์ (recurrent networks)

เครือข่ายแบบรีเคอร์เรนต์เป็นเครือข่ายที่มีการตอบกลับ (feedback) โดยเอาทพุตเชื่อมต่อกับอินพุต ในภาพที่ 30 ก็แบบหนึ่งที่เรียกว่า เครือข่าย discrete-time recurrent



ภาพที่ 30 เครือข่ายแบบรีเคอร์เรนต์

ที่มา: Martin *et al.* (1996)

ในเครือข่ายเช่นนี้ เวกเตอร์ p เป็นเงื่อนไขเริ่มต้น ($a(0) = p$) แล้วเอาที่พูดของเครือข่าย คำนวณโดย เอาที่พูดก่อนหน้านี้ ดังสมการที่ 15

$$a(1) = \text{satlins}(W a(0) + b), a(2) = \text{satlins}(W a(1) + b), \dots \quad (15)$$

ลักษณะที่แตกต่างจากเครือข่ายที่กล่าวมาข้างต้นถือว่าแตกต่างกันมากทีเดียว ซึ่งลักษณะที่แตกต่างกันนี้ทำให้เครือข่ายแบบบริเคอร์เรนทเป็นเครือข่ายที่มีประสิทธิภาพมากกว่าเครือข่ายแบบป้อนไปข้างหน้า (feedforward networks)

แบ็คพรอพาเกชัน (backpropagation)

perceptron learning rule ของ Frank Rosenblatt และวิธี least mean square (LMS) ของ Bernard Widrow และ Marcian Hoff ถูกออกแบบให้ฝึกหัดเครือข่ายเปอร์เซปตรอนชั้นเดียว (Single-Layer Perceptron Networks) ซึ่งเครือข่ายดังกล่าวมีข้อจำกัดในการแก้ปัญหา คือ แก้ปัญหาได้เฉพาะปัญหาการแบ่งกลุ่มเชิงเส้น (linear separable classification) ทั้ง Rosenblatt และ Bernard ก็รู้ถึงข้อจำกัดนี้และพยายามเสนอเครือข่ายหลายชั้น (multilayer networks) แต่ก็ไม่สามารถแก้ปัญหาเหล่านี้ได้

วิธีการฝึกหัดเครือข่ายหลายชั้น (multilayer networks) ในช่วงแรก ๆ พบในวิทยานิพนธ์ของ Paul Werbos ในปี 1974 แต่ก็ยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก จนกระทั่งกลางปี 1980 วิธีแพร่ย้อนกลับ (backpropagation algorithm) ได้ถูกค้นพบอีกครั้งและแพร่หลายมากขึ้น ซึ่งค้นพบโดยนักวิจัยหลายท่านด้วยกัน เช่น David Rumelhart Geoffrey Hinton และ Ronald Williams David Parker และ Yann Le Cun วิธีการดังกล่าวนี้ได้รวบรวมไว้ในหนังสือ “Parallel Distributed Processing” ซึ่งรวบรวมโดย นักจิตวิทยา 2 คน คือ David Rumelhart และ James McClelland การตีพิมพ์หนังสือเล่มนี้เป็นแรงผลักดันที่สำคัญยังต้องงานวิจัยด้านเครือข่ายประสาทเทียม ในปัจจุบัน multilayer perceptron ที่ฝึกหัดโดยวิธีแพร่ย้อนกลับ แพร่หลายมากที่สุดในงานด้านเครือข่ายประสาทเทียม

1. วิธีแพร่ย้อนกลับ (the backpropagation algorithm)

วิธีแพร่ย้อนกลับสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย โดยการพิจารณาจากสัญลักษณ์ที่เขียนโดยย่อ เครือข่ายหลายชั้น (multilayer networks) เอาต์พุตของชั้นหนึ่ง จะเป็นอินพุตของอีกชั้นหนึ่ง สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 16

$$\mathbf{a}^{m+1} = \mathbf{f}^{m+1} (\mathbf{W}^{m+1} \mathbf{a}^m + \mathbf{b}^{m+1}) \quad \text{สำหรับ } m = 0, 2 \dots, M-1 \quad (16)$$

เมื่อ M คือ จำนวนชั้นในเครือข่าย โดยนิวรอนชั้นที่ 1 จะรับอินพุตจากภายนอก (external inputs) ดังสมการที่ 17

$$\mathbf{a}^0 = \mathbf{p} \quad (17)$$

สืบเนื่องจากสมการที่ 16 เอาต์พุตของนิวรอนในชั้นสุดท้ายจะเป็นเอาต์พุตของเครือข่าย ดังสมการที่ 18

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}^M \quad (18)$$

1.1 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะ (performance index)

วิธีแพร่ย้อนกลับ สำหรับเครือข่ายหลายชั้น (multilayer networks) เป็นเครือข่ายที่สร้างขึ้นด้วยวิธี LMS ซึ่งวิธีการนี้ใช้ mean square error (MSE) เป็นดัชนีชี้วัดสมรรถนะ ซึ่งวิธีการนี้พิจารณาจากกลุ่มตัวอย่างและคำตอบจากเครือข่าย ดังสมการที่ 19

$$\{p_1, t_1\} \{p_2, t_2\}, \dots, \{p_q, t_q\} \quad (19)$$

เมื่อ p_q คือ ค่าอินพุตหรือตัวแปรนำเข้า (input) ในเครือข่าย และ t_q คือ ค่าเป้าหมาย (target) เอาท์พุตจากเครือข่ายหรือเรียกว่าตัวแปรนำออก (output) จะต้องเทียบกับค่าเป้าหมาย ซึ่งจะเป็นการปรับค่าตัวแปรเพื่อให้ได้ค่า MSE น้อยที่สุด ดังสมการที่ 20

$$F(\mathbf{x}) = E[e^2] = E[(t - a)^2] \quad (20)$$

เมื่อ $\mathbf{x}$ คือ เวกเตอร์ของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส อาจเขียนเขียนได้อีกรูปแบบหนึ่ง ดังสมการที่ 21

$$F(\mathbf{x}) = E[\mathbf{e}^T \mathbf{e}] = E[(\mathbf{t} - \mathbf{a})^T (\mathbf{t} - \mathbf{a})] \quad (21)$$

วิธี LMS สามารถจะประมาณค่า ของ MSE โดยสมการที่ 22

$$\hat{F}(\mathbf{x}) = (\mathbf{t}(k) - \mathbf{a}(k))^T (\mathbf{t}(k) - \mathbf{a}(k)) = \mathbf{e}^T(k) \mathbf{e}(k) \quad (22)$$

เมื่อค่าคาดหวัง (expectation, E) ของค่าความผิดพลาดกำลังสอง (square error) เปลี่ยนไปในแต่ละรอบ (iteration) k จะได้ดังสมการที่ 22

ดังนั้นวิธี steepest descent สำหรับการหาค่า MSE สามารถหาได้ดังสมการ ที่ 23 และ 24

$$w_{i,j}^m(k+1) = w_{i,j}^m(k) - \alpha \frac{\partial \hat{F}}{\partial w_{i,j}^m} \quad (23)$$

$$b_i^m(k+1) = b_i^m(k) - \alpha \frac{\partial \hat{F}}{\partial b_i^m} \quad (24)$$

เมื่อ α คือ อัตราการเรียนรู้ (learning rate)

1.2 กฎลูกโซ่ (chain rule)

ในกรณีเครือข่ายเชิงเส้นชั้นเดียว (single-layer linear network) อนุพันธ์ย่อย (partial derivatives) สามารถหาได้ไม่ยากนัก แต่สำหรับเครือข่ายหลายชั้น (multilayer network) ซึ่งค่าความผิดพลาดไม่ได้เป็นฟังก์ชันที่เด่นชัด (explicit function) ของค่าถ่วงน้ำหนักในชั้นซ่อน ดังนั้นการหาอนุพันธ์ของค่าเหล่านี้เป็นเรื่องที่ไม่ง่ายนัก เพราะค่าความผิดพลาดไม่ได้เป็นฟังก์ชันโดยตรง (indirect function) ของค่าถ่วงน้ำหนักในชั้นซ่อน ต้องใช้กฎลูกโซ่ในการหาค่าอนุพันธ์ เพื่อทบทวนเรื่องกฎลูกโซ่ สมมติให้ f เป็นฟังก์ชันที่เด่นชัดของตัวแปร n ต้องการที่จะหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน f เทียบกับตัวแปรตัวที่สาม (third variable) w ซึ่งกรณีอย่างนี้จำเป็นต้องใช้กฎลูกโซ่ ดังสมการที่ 25

$$\frac{df(n(w))}{dw} = \frac{df(w)}{dn} \times \frac{dn(w)}{dw} \quad (25)$$

ซึ่งแนวความคิดใช้ในการหาอนุพันธ์ของสมการที่ 23 และ 24 ดังแสดงในสมการ 26 และ 27

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial w_{i,j}^m} = \frac{\partial \hat{F}}{\partial n_i^m} \times \frac{\partial n_i^m}{\partial w_{i,j}^m} \quad (26)$$

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial b_i^m} = \frac{\partial \hat{F}}{\partial n_i^m} \times \frac{\partial n_i^m}{\partial b_i^m} \quad (27)$$

เทอมที่สองของแต่ละสมการสามารถหาได้โดยง่ายจากอินพุตสุทธิ (net input) ในชั้น m เป็นฟังก์ชันเด่นชัดของค่าถ่วงน้ำหนักและไบแอส ในชั้นนั้น (ดังสมการที่ 28)

$$n_i^m = \sum_{j=1}^{S^{m-1}} w_{i,j}^m a_j^{m-1} + b_i^m \quad (28)$$

ดังนั้น จึงได้สมการที่ 29

$$\frac{\partial n_i^m}{\partial w_{i,j}^m} = a_j^{m-1}, \frac{\partial n_i^m}{\partial b_i^m} = 1 \quad (29)$$

กำหนดให้ (ดังสมการที่ 30)

$$S_i^m \equiv \frac{\partial F}{\partial n_i^m} \quad (30)$$

สมการที่ 23 และ 24 สามารถเขียนได้อีกรูปแบบหนึ่งคือ (ดังสมการที่ 31 และ 32)

$$w_{i,j}^m(k+1) = w_{i,j}^m(k) - \alpha S_i^m a_j^{m-1} \quad (31)$$

$$b_i^m(k+1) = b_i^m(k) - \alpha S_i^m \quad (32)$$

หรืออาจเขียนในรูปเมตริกซ์ (ดังสมการที่ 33 และ 34)

$$\mathbf{W}^m(k+1) = \mathbf{W}^m(k) - \alpha \mathbf{S}^m (\mathbf{a}^{m-1})^T \quad (33)$$

$$\mathbf{b}^m(k+1) = \mathbf{b}^m(k) - \alpha \mathbf{S}^m \quad (34)$$

การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และเครือข่ายประสาทเทียม ในด้านการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยแม่พิมพ์

Davis *et al.* (2003) ได้พบว่าในระหว่างการแข็งตัว (solidification) ของผลิตภัณฑ์ในแม่พิมพ์อัด ความเค้นตกค้าง (residual stress) ค่อย ๆ เกิดขึ้น ตลอดกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการแข็งตัว ความซับซ้อนของคุณสมบัติทางกลและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงทำให้เกิดการหดตัวและการบิดตัวของผลิตภัณฑ์ และสามารถใช้เทคนิคเชิงเลข (numerical technique) ในการคำนวณปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ โดยพบว่าการรวมการไหล การวางเรียงตัวของเส้นใย (fiber orientation) คุณสมบัติของวัสดุ (material property) และผลจากอุณหภูมิ สามารถหาค่าการบิดตัวของกันชนในยานยนต์ได้

Deng (1990) กล่าวถึงตัวแปรสองส่วนที่มีต่อผลการเกิดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ยางในแม่พิมพ์ฉีด โดยส่วนแรกคือคุณสมบัติของยาง ซึ่งได้แก่การขยายตัวของยางที่มากกว่าโลหะที่ใช้ทำแม่พิมพ์รวมถึงชนิดและจำนวนของสารแต่งเติม (filler) และในส่วนที่สอง ซึ่งมาจากตัวแปรในกระบวนการ (processing variables) ซึ่งก็ได้แก่ อุณหภูมิแม่พิมพ์ (mould surface temperature) ความดันในการฉีด (injection moulding pressure) เวลาการเวลาคงรูปยาง (cure time) ความดันย้ำ (holding pressure) และอัตราการไหล (flow rate) ซึ่งสอดคล้องกับ Wheelans (1974) ซึ่งได้แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการเกิดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ยางในแม่พิมพ์อัด และแม่พิมพ์ฉีด โดยกล่าวว่าค่าเฉลี่ยของการหดตัว ในแม่พิมพ์ฉีดมีน้อยกว่าแม่พิมพ์อัด ช่วงของการหดตัวในแม่พิมพ์ฉีดแคบกว่าแม่พิมพ์อัด และถ้าเทียบกันระหว่างผลิตภัณฑ์ในสายการผลิตเดียวกัน (batch) ของส่วนผสมยาง ค่าการหดตัวของแม่พิมพ์ฉีดจะมีค่าน้อยกว่าแม่พิมพ์อัด นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดการเกิดการหดตัวนั้นจะเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ (non-uniform) และเกิดในทุกทิศทาง ความแปรปรวนในการเกิดการหดตัว เกิดจากการกระจาย (dissipation) ของความเครียดภายใน (internal strain) ที่เกิดขึ้นระหว่างบดผสม (compounding) และการคงรูป (vulcanization) ซึ่งอัตราการกระจายนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วตามเวลา สำหรับการควบคุมความแปรปรวนของการเกิดการหดตัวในแม่พิมพ์อัด สามารถทำได้โดยการกำจัดสิ่งแปลกปลอม (orientation or grain effects) ในส่วนผสมยางก่อนเข้าแม่พิมพ์ และควบคุมตัวแปรกระบวนการผลิต (control of processing)

Rios *et al.* (2002) ได้ศึกษาการเกิดการหดตัวและการบิดตัวในแม่พิมพ์อัดโดยใช้วัตถุดิบเป็น sheet moulding compound (SMC) และ bulk moulding compound (BMC) พบว่าเป็นผลมาจากการวางเรียงตัวของเส้นใยและความเค้นดกค้ำที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต ซึ่งความเค้นดกค้ำนั้นเกิดจาก 2 ปัจจัยหลักคืออัตราการเวลาคงรูป (curing) และการให้ความร้อน (thermal history) นอกจากนี้ Kamal and Sourour (1973) ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการคงรูป โดยใช้แบบจำลองของ Folgar-Tucker ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์การเรียงตัวของเส้นใย โดยได้พิจารณา material's velocity gradients, strain rates และ fiber-fiber interaction จากแบบจำลองทั้งสอง Osswald *et al.* (1994) ได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์การเกิดการหดตัวและการบิดตัวในแม่พิมพ์อัดของ hood scoop และกันชนหลังของรถบรรทุก (pick-up rear fender) ได้เป็นอย่างดี

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้นำมาใช้ในการทำนายการบิดตัวในเครื่องสร้าง pur sandwich ของขึ้นส่วนยานยนต์ (Haberstroh and Kleba, 2001) การศึกษาหาลักษณะการบิดตัวของพลาสติกเสริมใยแก้ว (Barvinskii and Barvinskaya, 2002) ของขึ้นส่วน motor vehicle radiator tank ซึ่งเกิดจากอิทธิพลการเรียงตัวของเส้นใยอันเกิดจากการวางตำแหน่งช่องทางไหล (runner) ในตัวแม่พิมพ์ โดยนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองการเรียงตัวของเส้นใย เพื่อทำนายพฤติกรรมการหดตัวและการเสียรูป (deformation) ขึ้นงานฉีด ซึ่งวัสดุที่ใช้ทดสอบคือวัสดุผสม polypropylene เกรด Armlen PP SV 2T ที่ผลิตโดย Poliplastik แล้วทำการทดสอบด้วยตำแหน่งช่องทางไหล 3 แบบ ผลคำนวณที่ได้แสดงให้เห็นว่า transverse rigidity ของ radiator tank เพิ่มขึ้น และการบิดตัวลดลงอย่างชัดเจน การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Novitskii and Babaevskii, 2002) ในการพยากรณ์การเรียงตัว orientation) ของเส้นใยระหว่างการไหลของสารประกอบโพลิเมอร์ผ่านช่องทางขนาดเล็ก (narrow channel) ซึ่งได้แสดงผลการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ โดยใช้สัดส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่แตกต่างกัน 3 แบบ ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของการเรียงตัวของเส้นใยต่อสัดส่วนของความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

Choi and Im (1999) นำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการทำนายความเค้นตกค้าง การหดตัวและการยุบตัวของโพลิเมอร์อสัญฐาน (amorphous polymer) จากการศึกษาขึ้นส่วนทดสอบ ทำให้ทราบตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดการหดตัวคือ การหดตัวจะลดลงเมื่อเพิ่มความดันอัด (packing pressure) และอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุ (melting temperature) ความเร็วในการฉีด (injection velocity) และยังพบว่าระยะห่างจากเกจ (distance from gate) ไม่มีผลต่อการหดตัว ส่วนอุณหภูมิแม่พิมพ์ (mould temperature) ให้ผลการเกิดการหดตัวที่แตกต่างกันระหว่างวัสดุที่แตกต่างกัน การศึกษาการหดตัวของ Zheng *et al.* (1999) โดยใช้ fibre-reinforced thermoplastics พบว่ารูปร่างของขึ้นส่วนมีผลต่อการเกิดการหดตัว โดยด้านยาวของขึ้นส่วนจะเกิดมากกว่าด้านกว้าง

Kenig (2001) ศึกษาการใช้เครื่องช่วยประสานเทียมเข้าปรับปรุงผลิตภัณฑ์จากแม่พิมพ์ฉีด โดยใช้วัสดุโพลิเมอร์อสัญฐาน (amorphous polymer) เพื่อทำนายค่ามอดูลัส (tensile modulus) ในผลิตภัณฑ์ โดยคำนึงถึงตัวแปรต่างๆ ดังนี้ อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิหลอมเหลว ความดันอัด ความเร็วในการฉีด และเวลาในการหล่อเย็น พบว่าสามารถใช้แบบจำลองทำนายค่ามอดูลัสได้แม่นยำ

Sadeghi (2000) ใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม ในการทำนายคุณภาพชิ้นส่วน เครื่องคิดเลข CASIO รุ่น fx-570s โดยใช้ตัวแปรในกระบวนการผลิตคือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิหลอมเหลว ความดันในการฉีด และค่า melt flow rate (MFR) พบว่าสามารถทำนาย ผลจากวัสดุเดียวกันแต่เกรดต่างกัน ได้

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ซอฟต์แวร์

1.1 โปรแกรม MATLAB® (neural network toolbox) สำหรับใช้ในขั้นตอนการศึกษา ออกแบบและทดสอบเพื่อหาสถาปัตยกรรมที่เหมาะสมของเครือข่ายประสาทเทียม

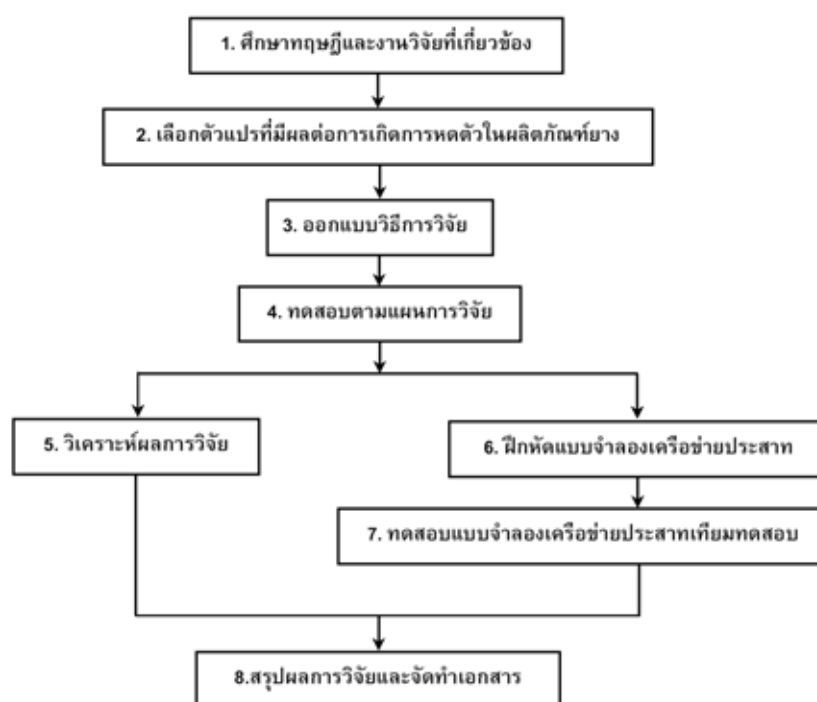
2. ฮาร์ดแวร์

ในการดำเนินการวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องมือต่าง ๆ เช่น เครื่องมือสำหรับการบดผสมยาง เครื่องอัดขึ้นรูป เครื่องมือในการตรวจวัด ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ส่วนเครื่องมือในการสร้างแม่พิมพ์ แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป ตรวจวัดขนาดของแม่พิมพ์และขนาดของผลิตภัณฑ์ยางโอริง ได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

- 2.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ (CPU Pentium 4 3.0 GHz, RAM 1 GB, HDD 120 GB)
- 2.2 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill)
- 2.3 เครื่องบดผสมภายใน (internal mixer or kneader)
- 2.4 เครื่องออสซิลเลตติงดิสก์โอมิเตอร์ (oscillating disk rheometer, ODR)
- 2.5 เครื่องอัดขึ้นรูป (compression moulding machine)
- 2.6 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป (compression mould) ผลิตภัณฑ์โอริง
- 2.7 เวอร์เนียคาลิเปอร์ (vernier caliper)
- 2.8 ไมโครมิเตอร์ (micrometer)
- 2.9 โปรไฟล์โปรเจกเตอร์ (profile projector) สำหรับตรวจวัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน
- 2.10 เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple)
- 2.11 นาฬิกาจับเวลา (stop watch)

วิธีการ

ขั้นตอนดำเนินการในงานวิจัยนี้ ได้แสดงในภาพที่ 31



ภาพที่ 31 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. ตัวแปรที่พิจารณาในการวิจัย

1.1 การเลือกตัวแปร

ผลของการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อพิจารณาตัวแปรที่มีผลต่อการหดตัวและบิดตัวของผลิตภัณฑ์ยางที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป ทำให้สามารถจำแนกตัวแปรออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ตัวแปรที่มาจากยางผสม (compound variables) และตัวแปรในกระบวนการผลิต (processing variables)

จากการทดลองเบื้องต้น พบว่า การหดตัวที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ยางในรูปแบบ และลักษณะต่าง ๆ มีความแตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาขนาดของแม่พิมพ์ (mould sizing) ที่มีผลต่อการหดตัว

หลังจากที่ได้กำหนดตัวแปรที่มีผลต่อการหดตัวทั้งหมด ขั้นตอนต่อไปจะเป็น การคัดเลือกตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย ส่วนตัวแปรที่ไม่ถูกเลือกจะต้องควบคุมให้คงที่ ซึ่งเรียกว่า ตัวแปรควบคุม จากนั้นนำตัวแปรที่เลือกมาทำการออกแบบการทดลอง เพื่อพิสูจน์หรือยืนยันถึง สมมติฐานที่ตั้งไว้ว่าตัวแปรเหล่านั้น น่าจะมีผลต่อการหดตัวของผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งในการ ทดลองนี้จะใช้หลักการทางสถิติวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ออกแบบการทดลอง เมื่อทำการวิเคราะห์ ข้อมูลในเชิงสถิติแล้ว ต้องทำการตีความออกมาเพื่อใช้ในการทดสอบต่อไป โดยผลสรุปที่ได้จาก ทดลองจะสามารถบอกได้ว่าตัวแปรใดบ้างที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองที่สนใจในกระบวนการ ที่ทำการศึกษาด้วยระดับความเชื่อมั่นอย่างมีนัยสำคัญตามที่ต้องการ

1.2 การกำหนดตัวแปรและระดับของตัวแปร

การกำหนดตัวแปรที่เลือกมาข้างต้น ได้แก่ ตัวแปรจากยางผสม และตัวแปรจาก กระบวนการผลิต ซึ่งเป็นตัวแปรที่กล่าวโดยรวมจึงกำหนดตัวแปรที่ต้องการและเหตุผลที่เลือกไว้ใน ตารางที่ 8 และ 9 ตามลำดับ

ตารางที่ 8 ตัวแปรจากยางผสมที่เลือกมาเพื่อใช้ในการวิจัย

ตัวแปร	ระดับ	เหตุผลที่เลือก
1. กำมะถัน	0.5 และ 2.5 phr	ปฏิกิริยาเคมีของการคงรูปมีความซับซ้อนมาก และคุณสมบัติของ ทางกายภาพของยางที่คงรูปแล้ว ขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของ พันธะเคมีเชื่อมโมเลกุลที่เกิดขึ้น อาจเป็น mono- (1) di- (2) tri- (3) หรือมากกว่า 3 คือ poly-sulphide ปริมาณพันธะเคมีแต่ละชนิดจะ มากน้อยอย่างไรส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับ ระบบการทำให้ยางคงรูป (วรารณ, 2541) จึงตั้งสมมติฐานว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวมีผลต่อ การหดตัว อีกทั้งกำมะถันมีใช้กันในปริมาณมากที่สุดในระบบ คงรูป เพราะมีราคาประหยัดและผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติที่ดี

ตารางที่ 8 (ต่อ)

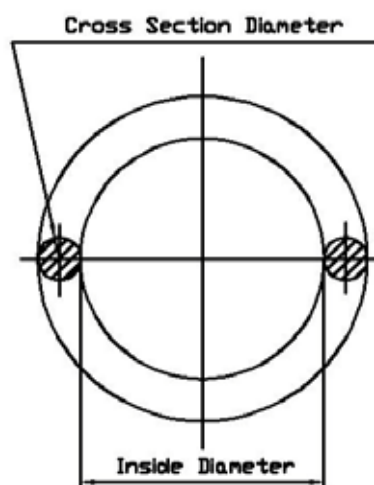
ตัวแปร	ระดับ	เหตุผลที่เลือก
2. เขม่าดำ	5 และ 50 phr	เขม่าดำเป็นสารตัวเติมที่มีการใช้ในอุตสาหกรรมยางมากถึง 90% (อรอุยา, 2546) โดยเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง (Reinforcement) เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของยางให้มีสภาพทนต่อแรงดึง ทนแรงอัด ทนต่อการตัด โคล้ง แต่ที่น่าสนใจคือสามารถลดการหดตัวของชิ้นงานได้ เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำมากขึ้น ปริมาณเนื้อยางจะน้อยลงทำให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวลดลง เป็นผลให้การหดตัวลดลง (วราภรณ์, 2542)

phr = parts per hundred of rubber

ตารางที่ 9 ตัวแปรในกระบวนการผลิตที่เลือกมาเพื่อใช้ในการวิจัย

ตัวแปร	ระดับ	เหตุผลที่เลือก
1. อุณหภูมิ แม่พิมพ์	140 และ 160 °C	ปฏิกิริยาเคมีของการคงรูปมีความซับซ้อนมาก และคุณสมบัติของทางกายภาพของยางที่คงรูปแล้ว ขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของพันธะเคมีเชื่อมโมเลกุลที่เกิดขึ้น อาจเป็น mono- (1) di- (2) tri- (3) หรือมากกว่า 3 (poly-sulphide) ปริมาณพันธะเคมีแต่ละชนิดจะมากน้อยอย่างไรขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ซึ่งรวมถึง คือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ (วราภรณ์, 2541) อีกทั้งการขยายตัวทางความร้อน (thermal expansion) ซึ่งเป็นสาเหตุของการหดตัวนั้น เป็นผลโดยตรงจากความอุณหภูมิที่แตกต่าง

ในส่วนของตัวแปรจากขนาดแม่พิมพ์ เนื่องรูปแบบของผลิตภัณฑ์มีหลากหลายมาก เพื่อเป็นการลดผลกระทบ (effect) ที่เกิดจากรูปแบบแม่พิมพ์ที่แตกต่างกัน จึงได้กำหนดให้มีรูปแบบแม่พิมพ์เป็นแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ยางโอริง ซึ่งมีลักษณะเป็นวงแหวน โดยตัวแปรที่ศึกษา คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (inside diameter) และเส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัด (cross section diameter) (ดังแสดงในภาพที่ 32) และได้แสดงเหตุผลในการเลือกไว้ในตารางที่ 10



ภาพที่ 32 ตัวแปรในการศึกษาผลิตภัณฑ์ยางโอริง

ตารางที่ 10 ตัวแปรจากขนาดแม่พิมพ์ที่เลือกมาเพื่อใช้ในการวิจัย

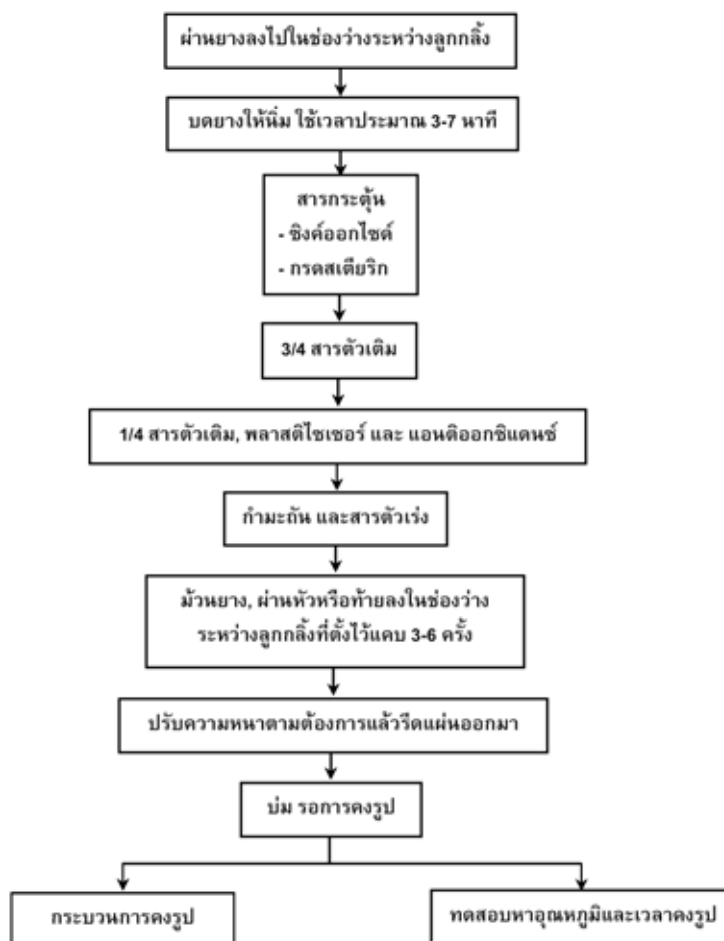
ตัวแปร	ระดับ	เหตุผลที่เลือก
1. เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	5 และ 45 มม.	แม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์เป็นแม่พิมพ์ที่ไม่มีความซับซ้อนมาก
2. เส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัด	2 และ 8 มม.	ต้นทุนการผลิตต่ำ แต่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย และมีขนาดที่ใช้งานแตกต่างกันตามสภาพงาน รวมถึงรูปทรงของผลิตภัณฑ์มีลักษณะที่เหมือนกัน คือ ลักษณะเป็นวงแหวน ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้เป็นการกำจัดตัวแปรที่มาจากรูปแบบที่ต่างกัน

2. การเตรียมชิ้นงานยาง

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานยาง (ดังแสดงในภาพที่ 33) เริ่มจากการ นำยางธรรมชาติมาบด ด้วยเครื่องบดผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกกลิ้งเท่ากับ 200 มม. เป็นเวลาประมาณ 3-7 นาที โดยกำหนดให้อุณหภูมิของลูกกลิ้งที่ 70 °C และใช้อัตราส่วน ความเร็วของลูกกลิ้งชุดหน้าและหลังเท่ากับ 1/1.25 เพื่อลดน้ำหนักโมเลกุลหรือความหนืดของยาง โดยใช้ยางผ่านลูกกลิ้ง 6 ครั้ง จากนั้นจึงทำการผสมสารเคมีและสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 11 สูตรยางขณะทำการบด จะใช้มีดตัดยาง (milling knife) กรีดยางและม้วนยาง จนกระทั่งสารเคมีและสารตัวเติมเข้ากับเนื้อยางจนทั่วถึง จากนั้นปรับระยะลูกกลิ้งออกห่าง ประมาณ 7 มม. (ขนาดของยางผสม กว้าง 45 มม. หนา 45 มม. หนา 7 มม.) แล้วตั้งยางผสมทิ้งไว้ อย่างน้อย 2 ชม. อย่างมาก 24 ชม. และมากที่สุด 72 ชม. ก่อนที่จะนำยางไปผ่านการคงรูป (สถาบันวิจัยยาง, 2545) ในงานวิจัยนี้จะใช้เวลา 12 ชม.

ตารางที่ 11 สูตรยางต่าง ๆ ที่ใช้ในการบดผสม

ส่วนผสม	ปริมาณ (phr)
STR 20	100
N550, FEF Black	5 27.5 50
zinc oxide	3
stearic acid	1
wax	5
N- (1,3-Dimethylbutyl)-N'-Phenyl-P-Phenylene Diamine, 6PPD	3
sulphur	0.5 1.5 2.5
N-Cyclohexyl-2-Benzothiazole Sulfonamide, CBS	2.0 1.3 0.8
Tetramethylthiuram Disulfide, TMTD	1.4 0.5 0.3

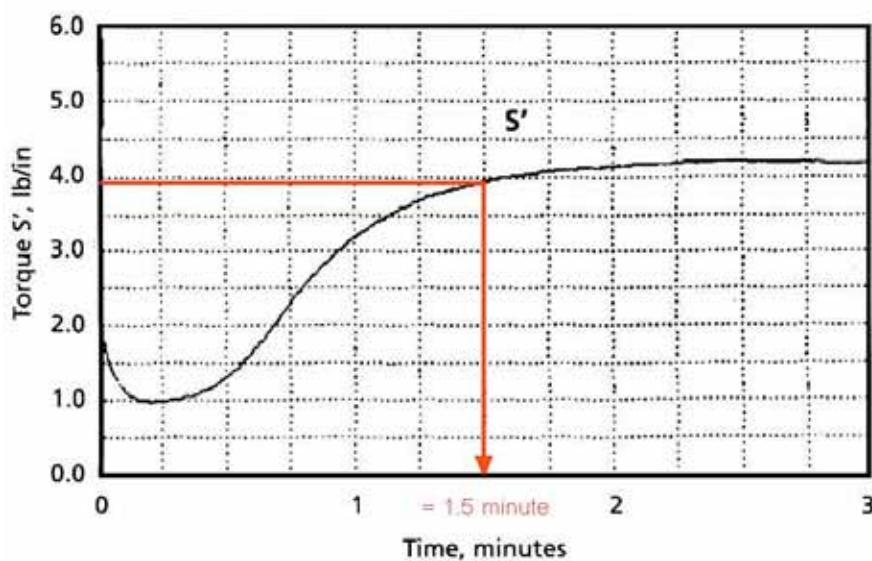


ภาพที่ 33 ขั้นตอนการบดผสมยางด้วยเครื่องบด 2 ลูกกลิ้ง

ที่มา: วราภรณ์ (2541)

3. ทดสอบคุณสมบัติของยางผสมเพื่อหาอุณหภูมิแม่พิมพ์ (mould temperature) และเวลาคงรูป (cure time)

ตัดยางผสม ให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ กว้าง 50 มม. ยาว 50 มม. เพื่อนำไปทดสอบอุณหภูมิและเวลาคงรูปที่เหมาะสม โดยใช้เครื่อง ODR เพื่อหาเวลาที่ยางสุกเหมาะสม (optimum cure) ที่อุณหภูมิทดสอบเท่ากับ 140, 150 และ 160 °C เป็นเวลา 30 นาที โดยพิจารณาจากเส้นกราฟการไหล และเลือกค่าแรงบิดที่ 90% จากนั้นตีเส้นขนานกับแกนเวลาเพื่อหาค่าเวลาที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นภาพที่ 90% (T_{90}) อ่านค่าเวลาที่ได้ เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 34



ภาพที่ 34 วิธีการหาเวลาคงรูป

ที่มา: Ciesielski (1999)

4. การผลิตผลิตภัณฑ์ยางโอริงโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป

4.1 การเตรียมชิ้นงานยาง (blank)

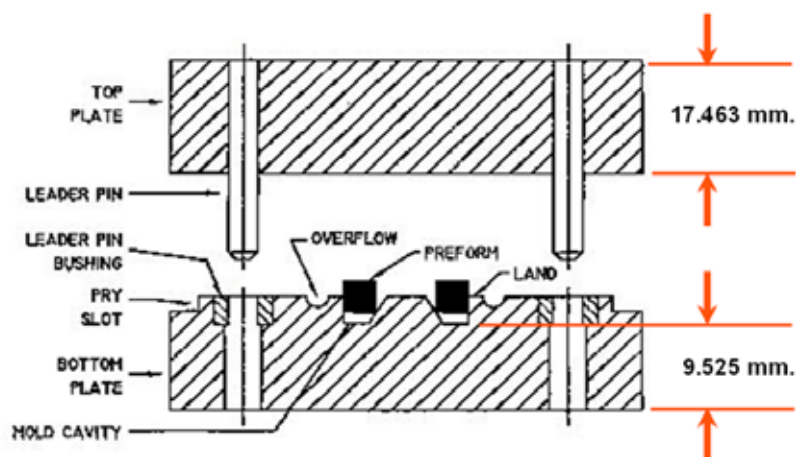
นำยางที่ผสมสารเคมีแล้วมาทำการตัดให้ได้ขนาดและรูปร่างตามต้องการ (ดังแสดงในภาพที่ 35) โดยทั่วไปมักจะเตรียมให้ชิ้นยางมีปริมาตรมากกว่าปริมาตรของแม่พิมพ์อยู่ประมาณ 5-15% ในงานวิจัยนี้ใช้ชิ้นงานยางที่มีปริมาตรมากกว่า 15%



ภาพที่ 35 ชิ้นงานยาง

4.2 การเตรียมแม่พิมพ์เพื่ออัดยางโอริง (Sommer, 2003)

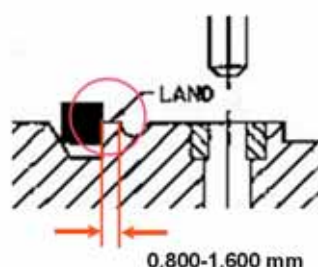
ข้อพิจารณาในการออกแบบแม่พิมพ์ เมื่อทำการระบุจำนวนองค์ประกอบและตำแหน่งของต่าง ๆ แล้ว (ดังแสดงในภาพที่ 36) ข้อที่ต้องพิจารณาต่อไป คือ ความหนาของแม่พิมพ์ (mould plate) จะต้องเพียงพอเพื่อป้องกัน หรือให้เกิดการตัดตัวน้อยที่สุด เมื่อแม่พิมพ์รับแรงสูงสุดในการอัด ความหนาของแผ่นแม่พิมพ์ที่มีช่องว่างแม่พิมพ์ (cavity) ต้องหนาน้อยที่สุด 9.525 มม. (0.375 in.) โดยวัดจากส่วนที่ลึกที่สุดของช่องแม่พิมพ์ถึงผิวของแม่พิมพ์ที่สัมผัสกับแผ่นกด (press platen) ส่วนแม่พิมพ์แผ่นบน (top plate) ควรมีความหนาน้อยที่สุด 17.463 มม. (0.6875 in.) เพื่อให้มีความแข็งแรงในการยึดเคียว (leader pins) พื้นที่ของแผ่นแม่พิมพ์จะต้องเพียงพอในรับแรงกดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายของแม่พิมพ์หรือเกิดรอยกดที่แผ่นแม่พิมพ์ ซึ่งรอยกดนี้เป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพเกิดการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าแผ่นแม่พิมพ์ที่ราบเรียบ



ภาพที่ 36 ส่วนประกอบและการกำหนดขนาดแม่พิมพ์อัด

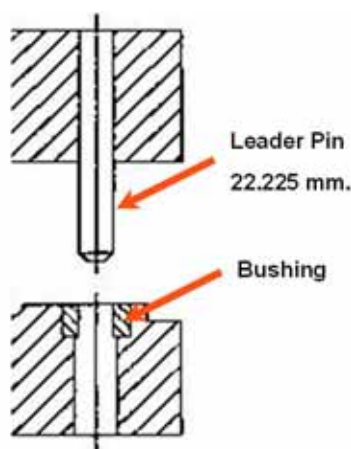
โลหะที่ใช้ทำแม่พิมพ์ มีอยู่หลายชนิด เช่น เหล็กหล่อเหนียว (mild steel) ไม่แข็งแรงง่าย แม่พิมพ์แบบนี้เหมาะสมสำหรับการใช้งานจำนวนไม่มากนัก เหล็กคาร์บอนสูง (high carbon steel) ซึ่งมีความแข็งแรงสามารถชุบแข็งได้ และเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) ทนทานต่อการเป็นสนิม แต่สร้างยากและนอกจากนี้ยังมีแม่พิมพ์ที่สร้างจากอลูมิเนียม (aluminium) ซึ่งมีความอ่อนและสร้างง่าย ใช้สำหรับแม่พิมพ์ยางพองน้ำ ซึ่งการเลือกนำไปใช้งานนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนการใช้งาน และลักษณะของยางผสมที่ใช้ขึ้นรูป สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้เหล็ก S50C

ในภาพที่ 37 แสดงให้เห็นการไหลของยางระหว่างแลนด์ (land) และแม่พิมพ์แผ่นบน ความกว้างของแลนด์ คือ ระยะจากเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของช่องว่างในแม่พิมพ์ถึงเส้นผ่านศูนย์กลางในของร่องยางล้น (Overflow) ความกว้างนี้ทั่วไปแคบสุด 0.127 มม. (0.005 นิ้ว) และกว้างสุด 4.763 มม. (0.1875 นิ้ว) โดยทั่วไปอยู่ในช่วงประมาณ 0.800-1.600 มม. (0.0312-0.062 นิ้ว) ส่วนคุณภาพผิวของแม่พิมพ์ มีความสำคัญกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการคุณภาพผิวที่ดี แม่พิมพ์ที่ใช้กันอยู่กับผลิตภัณฑ์ยางส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.250-0.510 มม. (10-20 micro นิ้ว)



ภาพที่ 37 ขนาดของแลนด์

ทั้งเดือย (leader pin) และบุช (bushing) ควรมีขนาดที่เหมาะสมและต้องผ่านการชุบแข็ง (hardened) เพราะจะได้รับแรงเค้น (stress) และสึกหรอระหว่างที่แม่พิมพ์เปิด-ปิด เดือยควรมีขนาดอย่างน้อยที่สุด 22.225 มม. (0.875 นิ้ว) (ดังแสดงในภาพที่ 38) แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับขนาดของแม่พิมพ์และปัจจัยอื่น ๆ ประกอบด้วย เมื่อศึกษาข้อมูลในการออกแบบแม่พิมพ์ จึงได้ทำการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ยางโอรังเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ (ดังแสดงในภาพที่ 39)



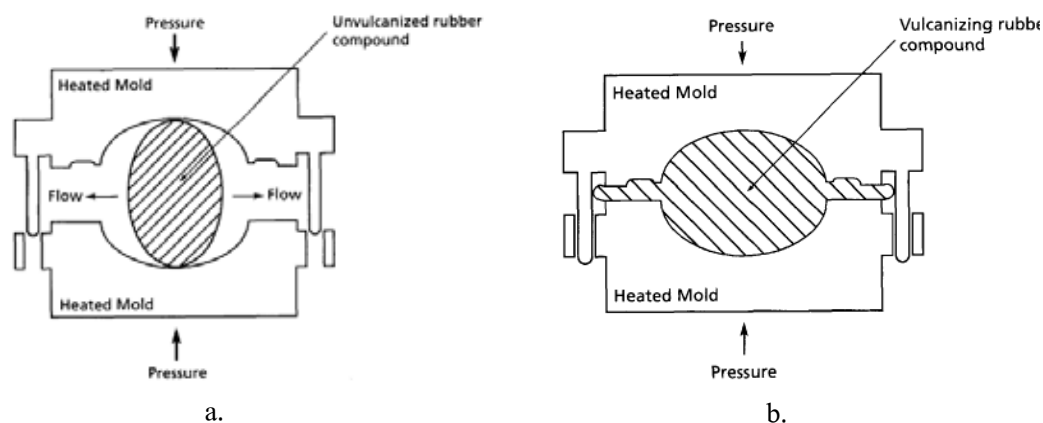
ภาพที่ 38 ขนาดของเดือย



ภาพที่ 39 แม่พิมพ์ผลิตโอริงที่ผลิตและใช้ในการศึกษาการหดตัวในงานวิจัย

4.3 การอัดขึ้นรูปยาง

ในส่วนของการอัดขึ้นรูปยาง (ดังแสดงในภาพที่ 40) จะนำชิ้นงานยางใส่เข้าไปที่ช่องว่างของแม่พิมพ์ แล้วปิดฝาหน้าเข้าไปอัดในเครื่องอัดไฮดรอลิก แล้วทำการอัดยางโดยเร็ว จนกระทั่งฝาบนของแม่พิมพ์เลื่อนขึ้นใกล้จะสัมผัสกับแผ่นอัดบน ก็ให้ลดความเร็วอัดลงเพื่อให้ยางไหลเข้าไปสู่ช่องว่างของแม่พิมพ์อย่างสม่ำเสมอ เพื่อไล่อากาศออกไปและให้เกิดแรงดันขั้วยางที่เกินให้ไหลล้นออกไปนอกช่องว่างของแม่พิมพ์ ยางที่ไหลล้นนี้ คือ ส่วนที่เรียกว่าเศษยาง (flash) สำหรับการป้องกันยางเริ่มคงรูป (scorch) ทำได้โดยการไม่ให้ความเร็วในการอัดช้าเกินไป เพื่อให้แน่ใจว่าสามารถไล่อากาศในแม่พิมพ์ได้หมด จะใช้การกดย้ำ 2 ครั้ง หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ยางออกจากแม่พิมพ์ เพื่อทำการตกแต่งต่อไป



ภาพที่ 40 วิธีการอัดขึ้นรูปยาง a. แม่พิมพ์กำลังปิด b. แม่พิมพ์ปิดภายใต้ความร้อนและความดัน

ที่มา: Ciesielski (1999)

ความดันในการอัดยางควรใช้ความดันที่ต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อป้องกันไม่ให้แม่พิมพ์ชำรุดหรือสึกหรอ แต่ควรจะให้สูงพอที่ยางไหลลื่นออก อย่างไรก็ดีตามในงานวิจัยนี้จะมุ่งศึกษาในส่วนของการหดตัวและขนาดของผลิตภัณฑ์ จึงจำเป็นต้องใช้ความดันให้เพียงพอเพื่อให้ลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากความดัน จึงใช้ความดันที่สูงพอคือ 4,000 ปอนด์/นิ้ว²

4.4 อุณหภูมิและเวลาในการอัดยาง

อุณหภูมิและเวลาของการอัดยาง เป็นกระบวนการทั้งขึ้นรูปและทำให้คงรูป (forming and vulcanizing) เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องกำหนดในการอัดทุกครั้ง โดยทั่วไปถ้าเพิ่มอุณหภูมิขึ้น 10 °C เวลาในการอัดจะลดลงไปได้ประมาณครึ่งหนึ่ง อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้อย่างคงรูปจริง ๆ นั้น ขึ้นอยู่กับสูตรของยางเป็นอย่างยิ่งรวมทั้งขึ้นอยู่กับความหนาของยางอีกด้วย โดยเมื่ออบยางที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ความหนาของยางที่เพิ่มขึ้น 1/4 นิ้ว จะต้องเพิ่มเวลาการอบให้ยางสุกประมาณ 5 นาที สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้อุณหภูมิและเวลาในการอัดยางที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง ODR

5. การหาค่าการหดตัว

งานวิจัยในส่วนนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาเพื่อหาตัวแปรจากยางผสมและกระบวนการผลิต และการศึกษาเพื่อหาตัวแปรที่มาจากขนาดแม่พิมพ์

5.1 การศึกษาเพื่อหาตัวแปรจากยางผสมและกระบวนการผลิตที่มีผลต่อการหดตัว

การออกแบบการทดลองในการศึกษานี้ จะใช้ตัวแปรหลักทั้งหมด 3 ตัวแปร และมีระดับของตัวแปร 2 ระดับ (ดังแสดงในตารางที่ 12) แผนการทดลองที่เหมาะสมกับการศึกษานี้ คือ การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบผลกระทบบางที่ เมื่อมีตัวแปร 2 ระดับ (2^k factorial design with fixed effect model)

5.2 การศึกษาเพื่อหาตัวแปรจากขนาดแม่พิมพ์ที่มีผลต่อการหดตัว

การออกแบบการทดลองในการศึกษานี้ จะใช้ตัวแปรหลักทั้งหมด 2 ตัวแปร และมีระดับของตัวแปร 2 ระดับ (ดังแสดงในตารางที่ 13) แผนการทดลองที่เหมาะสมกับการศึกษานี้ คือ การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบผลกระทบบางที่ เมื่อมีตัวแปร 2 ระดับ

ตารางที่ 12 แผนการทดลองเพื่อหาตัวแปรจากยางผสมและกระบวนการผลิตที่มีผลต่อการหดตัว

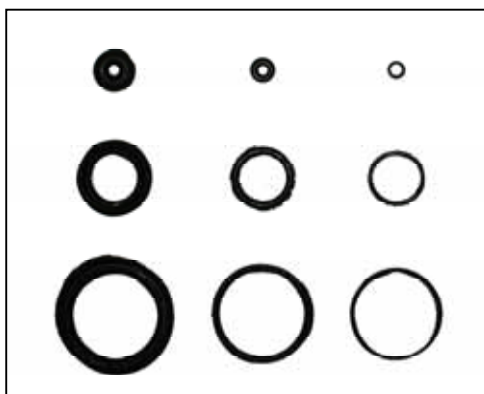
แผนการทดลองเพื่อหาตัวแปรจากยางผสมและกระบวนการผลิตที่มีผลต่อการหดตัว		
1. วัตถุประสงค์		
เพื่อเลือกตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวของผลิตภัณฑ์ยางโอริงที่ผ่านการอัดขึ้น		
2. ข้อมูลพื้นฐาน		
ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวของผลิตภัณฑ์ยางโอริง		
3. ตัวแปรต่างๆ ในการทดลอง		
3.1 ตัวแปรตอบสนอง	ค่าที่วัด	
การหดตัวของผลิตภัณฑ์ยาง โอริง - เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	มม.	
3.2 ตัวแปร	ระดับ	
ปริมาณเขม่าดำ (phr)	5	50
ปริมาณกำมะถัน (phr)	0.5	2.5
อุณหภูมิแม่พิมพ์, เวลาการอัด (°C, นาที)	140, T@140	160, T@160
3.3 ตัวแปรที่ควบคุม	ค่าที่ควบคุม	
ความดัน (psi)	4,000	
ขนาดยางคอมพาวด์ (blank) (มม. x มม.)	15 x 15	
ขนาดแม่พิมพ์ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน, เส้นศูนย์กลางภาคตัด(มม., มม.)	25, 4	
4. จำนวนซ้ำ การทดลองทั้งหมด $2^3 = 8$ ทำซ้ำ 3 ครั้ง ทั้งหมด 16 การทดลอง		
5. กำหนดเมตริกการออกแบบการทดลอง		
6. วิธีการสุ่ม การสุ่มอย่างสมบูรณ์ภายในบล็อก		
7. บันทึกผลการทดลอง		
8. การวิเคราะห์ผลการทดลอง		
8.1 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)		
8.2 กราฟตัวแปรตอบสนอง (respond plot)		
8.3 กราฟส่วนตกค้าง (residual plot)		
9. ระยะเวลาการทดลอง เดือนมกราคม-กุมภาพันธ์ 2549		
10. เวลาทำการทดลอง 9.00-15.00 น.		
11. การตรวจสอบการหดตัวของยางโอริง ใช้เครื่องโปรไฟล์โปรเจกเตอร์ในการตรวจวัด		

ตารางที่ 13 แผนการทดลองเพื่อศึกษานาถแม่พิมพ์ที่มีผลต่อการหดตัว

แผนการทดลองเพื่อศึกษานาถแม่พิมพ์ที่มีผลต่อการหดตัว		
1. วัตถุประสงค์		
เพื่อศึกษานาถของแม่พิมพ์ที่มีอิทธิพลต่อการหดตัว		
2. ข้อมูลพื้นฐาน		
ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวของผลิตภัณฑ์ยางโอริง		
3. ตัวแปรต่างๆ ในการทดลอง		
3.1 ตัวแปรตอบสนอง	ค่าที่วัด	
การหดตัวของผลิตภัณฑ์ยางโอริง ในทิศทาง - เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	มม.	
3.2 ตัวแปร	ระดับ	
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (มม.)	5	45
เส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัดหน้าตัด (มม.)	2	8
3.3 ตัวแปรที่ควบคุม	ค่าที่ควบคุม	
ปริมาณเขม่าดำ (phr)	27.5	
ปริมาณกำมะถัน (phr)	0.5	
อุณหภูมิแม่พิมพ์, เวลาการอัด (°C, นาที)	150, T@150	
ความดัน (psi)	4,000	
ขนาดยางคอมพาวด์ (มม. x มม.)	15 x 15	
4. จำนวนซ้ำ การทดลองทั้งหมด 2 ² = 4 ทำซ้ำ 3 ครั้ง ทั้งหมด 12 การทดลอง		
5. กำหนดเมตริกการออกแบบการทดลอง		
6. วิธีการสุ่ม การสุ่มอย่างสมบูรณ์ภายในบล็อก		
7. บันทึกผลการทดลอง		
8. การวิเคราะห์ผลการทดลอง		
8.1 วิเคราะห์ความแปรปรวน		
8.2 กราฟตัวแปรตอบสนอง		
8.3 กราฟส่วนตกค้าง		
9. ระยะเวลาการทดลอง เดือนมกราคม-กุมภาพันธ์ 2549		
10. เวลาทำการทดลอง 9.00-15.00 น.		
11. การตรวจสอบการหดตัวของยางโอริง ใช้ไมโครมิเตอร์ในการตรวจวัด		

5.3 วิธีหาค่าการหดตัว

เมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไป ทำการวัดขนาดของผลิตภัณฑ์โอริง (ดังแสดงในภาพที่ 41)



ภาพที่ 41 ยางโอริงที่ผ่านการอัดขึ้นรูป

5.3.1 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

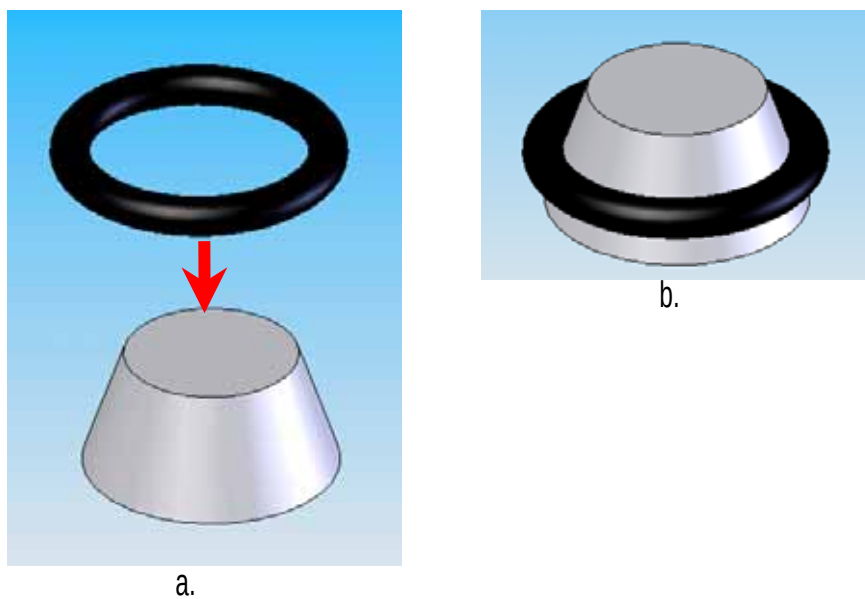
อุปกรณ์ที่ใช้

- 1) โปรไฟล์โปรเจกเตอร์ (profile projector)

วิธีการ

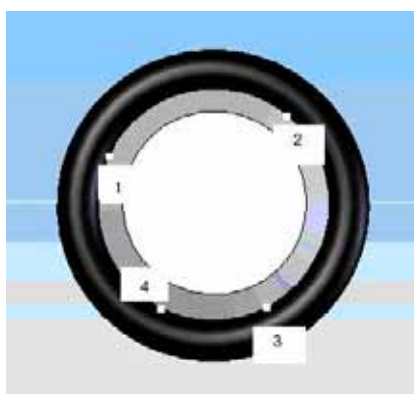
- 1) นำชิ้นงานใส่ในเหล็กรูปทรงกรวยที่เตรียมไว้ ดังแสดงในภาพที่ 42

เพื่อประคองให้ชิ้นงานมีลักษณะเป็นทรงกลมตามที่ต้องการ



ภาพที่ 42 แสดงการสวมโอริงในกรวยประกอบ a. ก่อนประกอบ b. หลังประกอบ

2) ใช้เครื่องโปรไฟล์โปรเจกเตอร์ ในการวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยทำการวัด 4 จุด แล้วเฉลี่ยเป็นเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังแสดงในภาพที่ 43



ภาพที่ 43 แสดงตำแหน่งการวัดด้วยเครื่องโปรไฟล์โปรเจกเตอร์

3) บันทึกผลลงในตาราง

4) เมื่อวัดชิ้นงานทั้งหมดแล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณค่าการหดตัว
 ดังสมการที่ 35

$$\% \text{Shrinkage} = \frac{D_m - D}{D_m} \times 100 \quad (35)$$

โดย D_m = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่วัดได้จากแม่พิมพ์ (มม.)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่วัดได้จากชิ้นงาน (มม.)

5) บันทึกข้อมูลที่คำนวณได้ เพื่อไปวิเคราะห์ผลทางสถิติและสร้างแบบจำลอง
 เครื่องข่ายประสาทเทียมต่อไป

5.3.2 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัด

อุปกรณ์ที่ใช้

1) ไมโครมิเตอร์

วิธีการ

1) วางชิ้นงานที่เตรียมไว้ ดังแสดงในภาพที่ 44 เพื่อวัดขนาดเส้นผ่าน
 ศูนย์กลางภาคตัด



ภาพที่ 44 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัด

2) บันทึกผลลงในตาราง

3) เมื่อวัดชิ้นงานทั้งหมดแล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณค่าการหดตัว
 ดังสมการที่ 35 โดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัดแทนเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

4) บันทึกข้อมูลที่คำนวณได้ เพื่อสร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม
 ต่อไป

5.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของการศึกษาเพื่อหาตัวแปรจากยางผสม จากกระบวนการผลิต และการศึกษาเพื่อหาตัวแปรจากขนาดแม่พิมพ์

การวิเคราะห์ผลที่ได้ให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้นจำเป็นต้องนำหลักการทางสถิติเข้ามา
 ช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบผลกระทบท
 ึ่งที่ ซึ่งตัวแปรมี 2 ระดับ สามารถทำได้ดังนี้

5.4.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) ของการออกแบบ
 การทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัยแบบบล็อกบริบูรณ์เชิงสุ่ม

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเพื่อหาตัวแปรที่มีผลต่อการหดตัว
 ของผลิตภัณฑ์ยางโอริง จะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ดังแสดงในตารางที่ 14) ซึ่งคำนวณ
 จากสมการที่ 36-41

ตารางที่ 14 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย
แบบจำลองผลกระทบคงที่

source of variance	sum of squares	degree of freedom	mean square	F_0
A treatment	SS_A	$a-1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B treatment	SS_B	$b-1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
interaction	SS_{AB}	$(a-1)(b-1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
error	SS_E	$ab(n-1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$	
total	SS_T	$abn-1$		

โดยที่

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (36)$$

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (37)$$

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{.j.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (38)$$

$$SS_{\text{Subtotals}} = \frac{1}{an} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (39)$$

$$SS_{AB} = SS_{\text{Subtotals}} - SS_A - SS_B \quad (40)$$

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{Subtotals}} \quad (41)$$

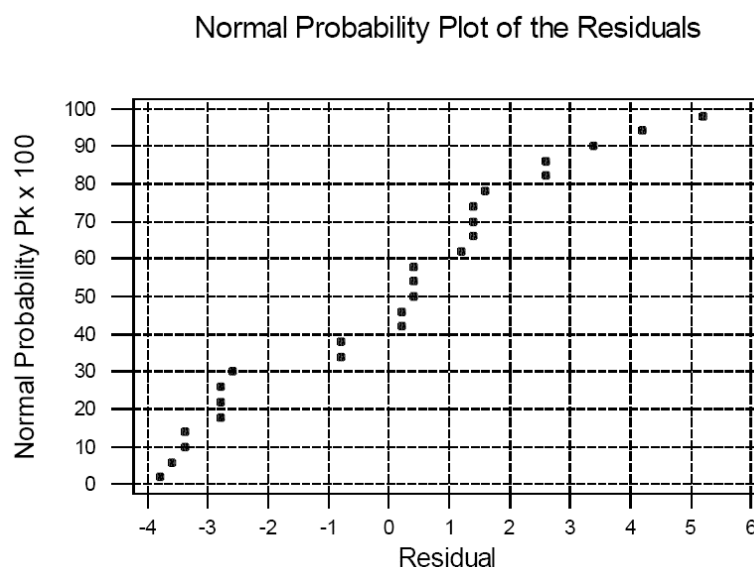
ในการพิจารณาถึงตัวแปรที่มีผลต่อการหดตัวของผลิตภัณฑ์ยางโอริง จะพิจารณาจากค่า F-ratio ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยที่ในทางทฤษฎีจะทำการเปรียบเทียบค่า F-ratio กับค่า Fวิกฤติที่ได้จากการเปิดตาราง F โดยที่ ถ้า F-ratio มากกว่า F วิกฤติ แสดงว่าตัวแปรนั้นมีผลต่อการหดตัว ถ้า F-ratio น้อยกว่าค่า F วิกฤติ แสดงว่าตัวแปรนั้นไม่มีผลต่อการหดตัว แต่ในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติส่วนใหญ่ จะคำนวณค่า P value ออกมาให้ ซึ่งในการพิจารณาค่า P value จะทำการเปรียบเทียบกับค่านัยสำคัญ (α) ถ้าค่า P value ที่คำนวณได้ในแต่ละตัวแปร ถ้ามีค่าน้อยกว่าค่า α แสดงว่าตัวแปรนั้นมีผลต่อการหดตัว แต่ถ้าค่า P value ที่คำนวณได้ในแต่ละตัวแปรมีค่ามากกว่าค่า α แสดงว่าตัวแปรนั้นไม่มีผลต่อการหดตัว สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่า α มีค่าเท่ากับ 0.05

5.4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (model adequacy checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ เป็นวิธีการตรวจสอบถึงความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์ความแปรปรวนว่าเป็นไปตามหลักการทางสถิติ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลมีอยู่ 3 ประเภท คือ

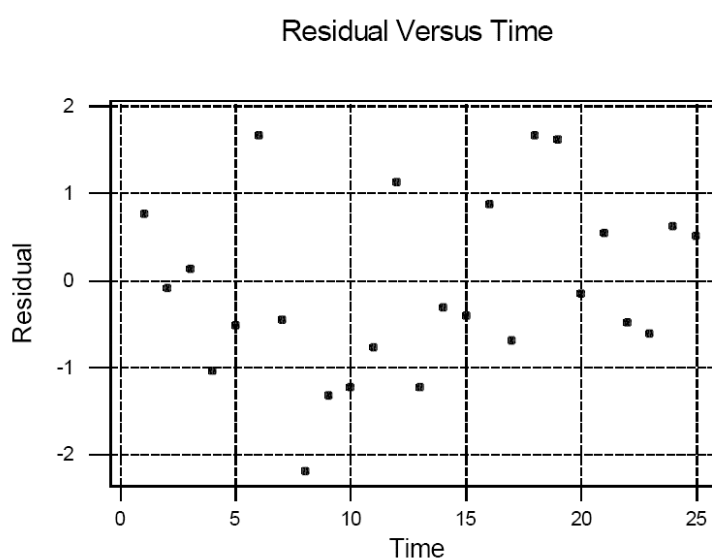
5.5.2.1 การตรวจสอบลักษณะของการแจกแจงแบบปกติ (normal distribution)

โดยการสร้าง normal probability plot ของค่าส่วนตกค้าง (residual) เป็นการพล็อตค่าส่วนตกค้างลงบนกราฟที่เรียกว่า normal probability paper ซึ่งพล็อตระหว่างส่วนตกค้างกับความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (k-1/2)/n$ โดย $P_k \times 100$ อยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้าง (ดังแสดงในภาพที่ 45) ถ้าหากการกระจายเป็นปกติ รูปที่พล็อตขึ้นมานี้จะเป็นเส้นตรง ซึ่งจะแสดงว่าข้อมูลนั้นเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน



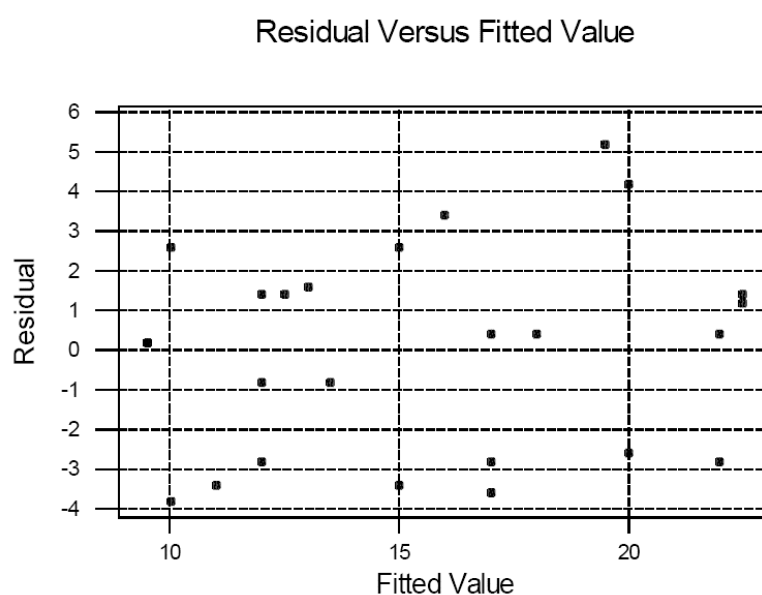
ภาพที่ 45 ตัวอย่าง normal probability plot

5.4.2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล ซึ่งทดสอบความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (residual) กับลำดับเวลาในการเก็บข้อมูล ค่าของส่วนตกค้างแต่ละค่าควรเป็นอิสระซึ่งกันและกันและต้องได้จากการทดลองแบบสุ่ม โดยพล็อตกราฟให้ค่าส่วนตกค้างเป็นแกนตั้งและลำดับเวลาเป็นแกนนอน (ดังแสดงในภาพที่ 46) หากข้อมูลมีความเป็นอิสระรูปที่พล็อตขึ้นมาจะกระจายทั่วไปไม่เป็นแนวโน้ม (trend) นั่นหมายความว่าข้อมูลเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน



ภาพที่ 46 ตัวอย่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาการเก็บข้อมูล

5.4.2.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง (residual) กับค่าที่ถูกฟิต (fitted value) ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมานี้จะกระจายอยู่ทั่วไป ไม่มีรูปแบบหรือโครงสร้างใด ๆ ทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด (ดังแสดงในภาพที่ 47)



ภาพที่ 47 ตัวอย่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต

6. การฝึกหัดแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมเพื่อให้ได้แบบจำลองที่เหมาะสม

ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติทำให้ทราบตัวแปรที่มีผลต่อการหดตัวของผลิตภัณฑ์ยาง และนำตัวแปรเหล่านั้นมาทดลองเพื่อให้ได้ข้อมูลนำไปพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

6.1 การทดลองเพื่อให้ได้ข้อมูล นำไปพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

ตัวแปรที่เกิดจากยางผสม คือ

1) ปริมาณของกำมะถัน (sulphur) หรือระบบการคงรูป (vulcanization system) ซึ่งแบ่งตามกำมะถันเป็นสารเคมีที่ใช้กันมากในการบดผสมมีคุณสมบัติช่วยในการคงรูปของยาง ทำให้คุณสมบัติของยางคงรูปที่ดีขึ้น ในงานวิจัยนี้ จะศึกษาที่ระบบคงรูปแบบอีวี (0.5 phr) เซมิอีวี (1.5 phr) และแบบกำมะถันปกติ (2.5 phr)

2) ปริมาณเขม่าดำ (carbon black) ซึ่งเป็นสารตัวเติม (filler) ที่มีต่อการหดรัด โดยทำการศึกษาที่ 3 ระดับ คือ 5 27.5 และ 50 phr ตามลำดับ ซึ่งเป็นช่วงที่ใช้ในการบดผสมยางทั่วไป

ตัวแปรในจากระบวนการผลิต คือ

3) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (mould temperature) ระดับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ 140 150 และ 160 °C ตามลำดับ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสม และเวลาคงรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ (cure condition)

ตัวแปรที่มาจากขนาดแม่พิมพ์ คือ

4) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (inside diameter) ระดับที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 5 25 และ 45 มม. ตามลำดับ

5) เส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัด (cross section diameter) ระดับที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 2 4 และ 8 มม. ตามลำดับ

ในส่วนการทดลองเพื่อให้ได้ข้อมูล นำไปพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมนั้น ทำการทดลอง ทั้งหมด 3 ชั่วโมง

6.2 ขั้นตอนในการฝึกเครือข่ายประสาทเทียม มีดังนี้

6.2.1 การจัดการข้อมูลที่ใช้ในการฝึก

6.2.1.1 ปรับขอบเขตของชุดข้อมูล (normalization) ตัวแปรนำเข้าให้อยู่ภายในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 1 (ซัชพล, 2545)

6.2.1.2 แบ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมด 292 ข้อมูล ออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่ใช้ในการฝึกหัด (train data) 243 ข้อมูล คือข้อมูลที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 1 และ 2 ส่วนที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพ (test data) 49 ข้อมูล คือข้อมูลที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 3

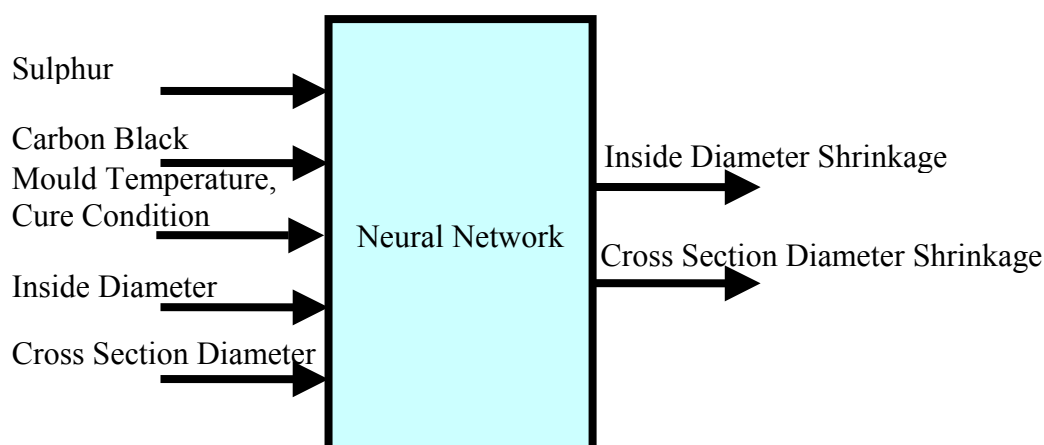
6.2.2 กำหนดอินพุตและเอาต์พุตในเครือข่ายประสาทเทียม (ดังแสดงในภาพที่ 48) ซึ่งตัวแปรที่สนใจมี 5 ตัวดังนี้

- 1) ปริมาณกำมะถัน
- 2) ปริมาณเขม่าดำ
- 3) อุณหภูมิแม่พิมพ์ และเวลาคงรูปที่อุณหภูมิแม่พิมพ์
- 4) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน
- 5) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัด

ในส่วนของตัวแปรนำออกซึ่งเป็นผลกระทบจากค่าตัวแปรที่กำหนดมีดังนี้

- 1) การหดตัวภายในของยางผลิตภัณฑ์ยางโอริง (inside diameter shrinkage)
- 2) การหดตัวภาคตัดของยางผลิตภัณฑ์ยางโอริง (cross section diameter

shrinkage)



ภาพที่ 48 ข้อมูลตัวแปรนำเข้าและตัวแปรนำออกของเครือข่ายประสาทเทียม

6.2.3 การออกแบบโครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียม

การทดลองนี้เลือกใช้ คือ วิธี Levenberg-Marquardt Backpropagation เนื่องจากเป็นวิธีที่ถูกลงสู่เป้าหมายที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วกว่าวิธีอื่น (Howard and Mark, 1998) ส่วนทรานเฟอร์ฟังก์ชันที่ใช้ในชั้นซ่อนและชั้นเอาต์พุตของเครือข่าย คือฟังก์ชันแบบซิกมอยด์ และแบบเชิงเส้น ตามลำดับ (Martin *et al.*, 1996) ปรับขอบเขตของค่าถ่วงน้ำหนัก ให้อยู่ในช่วง -0.5 – 0.5 เพื่อให้ขอบเขตของข้อมูลอยู่ในช่วงการทำงานของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน ใช้ไบแอสเป็นค่าคงที่ เท่ากับ 0.5 (ซัฟพล, 2545) สำหรับการออกแบบขององค์ประกอบต่าง ๆ ภายในเครือข่ายประสาทเทียมใช้การลองผิดลองถูกในช่วงกำหนด โดยจะเริ่มฝึกหัดเครือข่ายที่มีสถาปัตยกรรมที่ง่ายที่สุด คือ เครือข่ายที่มี 1 ชั้นซ่อน (1 hidden layer) (Abu-Sahra, 2003) โดยทำการผันแปรสถาปัตยกรรมและองค์ประกอบภายในต่าง ๆ ในเครือข่ายประสาทเทียมดังนี้

6.2.3.1 จำนวนของนิวรอนภายในชั้นซ่อน (number of neuron in hidden layer)

เริ่มจากจำนวนนิวรอน ของเครือข่ายที่มี 1 ชั้นซ่อน โดยให้จำนวนนิวรอนเริ่มต้นไม่มากกว่ากึ่งหนึ่งของผลรวมชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุต (ดังแสดงในสมการที่ 42) (Abu-Sahra, 2003) แต่ไม่มากกว่าสองเท่าของจำนวนนิวรอนในชั้นอินพุตบวกด้วยหนึ่ง (ซัฟพล, 2545) (ดังแสดงในสมการที่ 43)

$$\text{Minimum Neuron} = \frac{(\text{Output} + \text{Input})}{2} \quad (42)$$

$$\text{Maximum Neuron} = 2(\text{Input}) + 1 \quad (43)$$

6.2.3.2 อัตราการเรียนรู้ (learning rate)

6.2.3.3 จำนวนรอบของการฝึก (epochs) เป็นค่าที่กำหนดเพื่อให้เครือข่ายหยุดทำการฝึกเมื่อทำการฝึกถึงจำนวนรอบที่กำหนด

6.2.3.4 จำนวนชั้นซ่อน (hidden layer) งานวิจัยโดยทั่วไปจะให้จำนวนชั้นเท่ากับ 1 และ 2 ชั้น (Martin *et al.*, 1996)

6.2.4 กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการฝึก ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดก่อนเริ่มทำการฝึกมีดังนี้

6.2.4.1 ค่าความผิดพลาดเป้าหมาย (goal) เป็นค่าที่กำหนดเพื่อให้เครือข่ายหยุดการฝึกเมื่อความผิดพลาดจากเครือข่ายลดลงถึงค่าความผิดพลาดเป้าหมาย

6.2.5 ทดสอบประสิทธิภาพของเครือข่ายประสาทเทียม

ทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครือข่ายประสาทเทียมแบบต่าง ๆ ด้วยข้อมูลชุดที่ใช้ในการทดสอบเครือข่ายประสาทเทียม โดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำเฉลี่ย (average accuracy, %) ระหว่างค่าเอาต์พุตของการทดลองกับค่าเอาต์พุตของเครือข่ายประสาทเทียมเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของเครือข่ายประสาทเทียมเพื่อเลือกโครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดนำไปใช้ในการทำนายการหดตัวของผลิตภัณฑ์ยางโอริง

6.2.6 วิธีการเลือกเครือข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม

ในการเลือกสถาปัตยกรรมของเครือข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมกับการทำนายนั้น ยังไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่นอนมาใช้ในการออกแบบโครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียม ความเหมาะสมของโครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียมต่อกระบวนการที่สนใจขึ้นอยู่กับความซับซ้อนในกระบวนการ ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียม จึงใช้หลักการแบบลองผิดลองถูก

ในการพิจารณาสถาปัตยกรรมของเครือข่ายประสาทเทียมเพื่อนำไปใช้ ทำนายการหดตัวของผลิตภัณฑ์ยางโอริง ได้นำวิธีการทางสถิติมาใช้ในการศึกษาถึงอิทธิพลของการผันแปรโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบต่างๆ โดยใช้การวางแผนการทดลองปัจจัยเดียว (single factor experiment) การวางแผนการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (factorial experiment) การวิเคราะห์ผลโดยแผนภาพแบบกล่อง การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) และวิธีความแตกต่างนัยสำคัญน้อยสุด (least significant difference, LSD)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าที่ใช้แนวทางการฝึกแบบกระจายค่าผิดพลาดย้อนกลับ (backpropagation error) เนื่องจากเครือข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้านี้เป็นโครงสร้างพื้นฐานที่สามารถทำความเข้าใจได้ง่ายที่สุด โครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียมมีความซับซ้อนน้อยที่สุดและง่ายแก่การทำความเข้าใจรูปแบบการทำงาน จำนวนของนิวรอนในชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุตนั้นขึ้นอยู่กับชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึก ส่วนจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนหาได้โดยกำหนดจำนวนนิวรอนน้อยที่สุดจากสมการที่ 42 และจำนวนนิวรอนมากที่สุดจากสมการที่ 43 ในส่วนจำนวนของชั้นซ่อน และใช้หลักการลองผิดลองถูกในการกำหนดจำนวนชั้นซ่อน หากทั้งจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนหรือจำนวนชั้นซ่อนมีมากเกินไป อาจมีผลทำให้เครือข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายผลที่ให้ ความแม่นยำได้ดี เมื่อใช้ข้อมูลที่อยู่ในขอบเขตของข้อมูลที่ใช้ในการฝึกทำนายงานเป็นอินพุต แต่ไม่สามารถทำนายผลที่มีความแม่นยำได้หากใช้ข้อมูลที่อยู่นอกขอบเขตของข้อมูลที่ใช้ในการฝึกเครือข่ายประสาทเทียมมาเป็นค่าอินพุต

หลักการโดยทั่วไปของเครือข่ายประสาทเทียม คือ เมื่อป้อนข้อมูลลงไป ในแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม กำหนดสถาปัตยกรรมของเครือข่าย ซึ่งได้แก่การกำหนด จำนวนนิวรอนแต่ละชั้น และกำหนดขององค์ประกอบภายในของเครือข่าย ซึ่งได้แก่ การกำหนด ค่าเป้าหมาย อัตราการเรียนรู้ จำนวนรอบ และรูปแบบของทรานเฟอร์ฟังก์ชัน หลังจากนั้น แบบจำลองแบบแพร่ย้อนกลับจะทำการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมเพื่อการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก ที่เหมาะสมและถูกต้อง และแสดงผลตัวแปรนำออกที่ได้รับการฝึกหัด ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสม และถูกต้องที่สุดนั้นเมื่อเสร็จสิ้นการฝึกหัด โปรแกรมจะทำการเก็บค่าถ่วงน้ำหนักไว้ต่อไป ส่วนระยะเวลาในการฝึกหัดจะขึ้นอยู่กับ การตั้งค่าความผิดพลาด ค่าการเรียนรู้ และขึ้นอยู่กับ ปริมาณของข้อมูลที่ใช้ในการฝึก

6.3 การทดลองเพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดของเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ตัวแปรนำออก ในการทำนายการหดตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและการหดตัวของ เส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัด

การทดลองที่ 1 เพื่อกำหนดจำนวนตัวแปรนำเข้าที่เหมาะสมในการฝึกหัดเครือข่าย ประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 2 ตัวแปรนำออก

การทดลองที่ 1 เป็นการทดลองเพื่อกำหนดจำนวนตัวแปรนำเข้าที่เหมาะสม ในการฝึกหัด (ดังแสดงในตารางที่ 15) เครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 2 ตัวแปรนำออก คือ การหดตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและการหดตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัด ใช้วิธี วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว (single factor analysis of variance) ที่มีตัวแปรมี 2 ระดับ (หรือ 2 เงื่อนไข) กำหนดให้เป็นการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design)

การทดลองที่ 2 เพื่อกำหนดวิธีการจัดการข้อมูลที่เหมาะสมที่ใช้ในการฝึกหัดเครือข่าย ประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 2 ตัวแปรนำออก

การทดลองที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อกำหนดวิธีการปรับข้อมูลที่เหมาะสมที่ใช้ ในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 2 ตัวแปรนำออก คือ การหดตัวของ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในและการหดตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัด (ดังแสดงในตารางที่ 16) โดยนำจำนวนตัวแปรนำเข้าที่เหมาะสมจากผลการทดลองที่ 1 จากนั้นทำการเปรียบเทียบ

การปรับข้อมูล (normalization) ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 กับการไม่ปรับข้อมูล (unnormalization) และ ใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว ที่มีตัวแปร 2 ระดับ กำหนดให้เป็นการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์

การทดลองที่ 3 เพื่อกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ (learning rate) และจำนวนรอบ (epoch) ที่มีเหมาะสมในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 2 ตัวแปรนำออก

การทดลองที่ 3 เป็นการทดลอง เพื่อกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบที่เหมาะสมในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 2 ตัวแปรนำออก คือ การหาค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและการหาค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัด (ดังแสดงในตารางที่ 17) โดยใช้วิธีการจัดการข้อมูลจากการทดลองที่ 2 และใช้ตัวแปรหลักทั้งหมด 2 ตัวแปร และมีระดับของตัวแปร 3 ระดับ แผนการทดลองที่เหมาะสมกับการทดลองนี้ คือ การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบผลกระทบคงที่ เมื่อมีตัวแปร 3 ระดับ (3^k factorial design with fixed effect model) และกำหนดให้เป็นการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์

การทดลองที่ 4 เพื่อกำหนดจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่เหมาะสมในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 2 ตัวแปรนำออก

การทดลองที่ 4 เป็นการทดลองเพื่อกำหนดจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่เหมาะสมในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 2 ตัวแปรนำออก คือ การหาค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและการหาค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัด (ดังแสดงในตารางที่ 18) โดยใช้ข้อสรุปประกอบภายในที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3 และใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียวที่มีตัวแปร 9 ระดับ กำหนดให้เป็นการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์

การทดลองที่ 5 เพื่อกำหนดนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 ที่เหมาะสมในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นซ่อน และ 2 ตัวแปรนำออก

การทดลองที่ 5 เป็นการทดลองเพื่อกำหนดนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 ที่เหมาะสมในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นซ่อน และ 2 ตัวแปรนำออก คือ การหาค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและการหาค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัด (ดังแสดงในตารางที่ 19)

ที่ให้ค่าความแม่นยำเฉลี่ยสูงสุด โดยนำผลจากการทดลองที่ 4 มาเป็นตัวกำหนดจำนวนนิรอนน้อยที่สุดและมากที่สุดที่ใช้ในการทดลองที่ 5 และใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว ที่มีตัวแปร 16 ระดับ โดยกำหนดให้เป็นการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์

6.4 การทดลองเพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดของเครือข่ายประสาทเทียมที่มี

1 ตัวแปรนำออกในการทำนายการหดตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

การทดลองที่ 6 เพื่อกำหนดจำนวนตัวแปรนำเข้าที่เหมาะสมในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 1 ตัวแปรนำออก

การทดลองที่ 6 เป็นการทดลองเพื่อกำหนดจำนวนตัวแปรนำเข้าที่เหมาะสมในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 1 ตัวแปรนำออก คือ การหาค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (ดังแสดงในตารางที่ 20) ใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียวที่มีตัวแปร 2 ระดับ (หรือ 2 เงื่อนไข) กำหนดให้เป็นการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์

การทดลองที่ 7 เพื่อกำหนดวิธีการจัดการข้อมูลที่เหมาะสมที่ใช้ในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 1 ตัวแปรนำออก

การทดลองที่ 7 เป็นการทดลองเพื่อกำหนดวิธีการปรับข้อมูลที่เหมาะสมที่ใช้ในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 1 ตัวแปรนำออก คือ การหาค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (ดังแสดงในตารางที่ 21) โดยนำจำนวนตัวแปรนำเข้าที่เหมาะสมจากผลการทดลองที่ 6 จากนั้นทำการเปรียบเทียบการปรับข้อมูลให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 กับการไม่ปรับข้อมูลและใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว ที่มีตัวแปร 2 ระดับ กำหนดให้เป็นการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์

การทดลองที่ 8 เพื่อกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบที่เหมาะสมในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 1 ตัวแปรนำออก

การทดลองที่ 8 เป็นการทดลอง เพื่อกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบที่เหมาะสมในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 1 ตัวแปรนำออก คือ การหาค่า

ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (ดังแสดงในตารางที่ 22) โดยใช้วิธีการจัดการข้อมูลจากการทดลองที่ 7 และใช้ตัวแปรหลักทั้งหมด 2 ตัวแปร และมีระดับของตัวแปร 3 ระดับ แผนการทดลองที่เหมาะสมกับการทดลองนี้ คือ การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบผลกระทบคงที่ เมื่อมีตัวแปร 3 ระดับ และกำหนดให้เป็นการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์

การทดลองที่ 9 เพื่อกำหนดจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่เหมาะสมในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 1 ตัวแปรนำออก

การทดลองที่ 9 เป็นการทดลองเพื่อกำหนดจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่เหมาะสมในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 1 ตัวแปรนำออก คือ การหาค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (ดังแสดงในตารางที่ 23) โดยใช้องค์ประกอบภายในที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 8 และใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว ที่มีตัวแปร 9 ระดับ กำหนดให้เป็นการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์

การทดลองที่ 10 เพื่อกำหนดนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 ที่เหมาะสมในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นซ่อน และ 1 ตัวแปรนำออก

การทดลองที่ 10 เป็นการทดลองเพื่อกำหนดนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 ที่เหมาะสมในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นซ่อน และ 1 ตัวแปรนำออก คือ การหาค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ที่ให้ค่าความแม่นยำเฉลี่ยสูงสุด (ดังแสดงในตารางที่ 24) โดยนำผลจากการทดลองที่ 9 มาเป็นตัวกำหนดจำนวนนิวรอนน้อยที่สุดและมากที่สุดที่ใช้ในการทดลองที่ 10 และใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียวที่มีตัวแปร 18 ระดับ โดยกำหนดให้เป็นการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์

6.5 การทดลองเพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดของเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ตัวแปรนำออกในการทำนายการหดตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัด

การทดลองที่ 11 เพื่อกำหนดจำนวนตัวแปรนำเข้าที่เหมาะสมในการฝึกหัด
เครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 1 ตัวแปรนำออก

การทดลองที่ 11 เป็นการทดลองเพื่อกำหนดจำนวนตัวแปรนำเข้าที่เหมาะสม
ในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 1 ตัวแปรนำออก คือ การหดตัวของ
เส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัด (ดังแสดงในตารางที่ 25) ใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว
ที่มีตัวแปรมี 2 ระดับ กำหนดให้เป็นการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์

การทดลองที่ 12 เพื่อกำหนดวิธีการจัดการข้อมูลที่เหมาะสมที่ใช้ในการฝึกหัดเครือข่าย
ประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 1 ตัวแปรนำออก

การทดลองที่ 12 เป็นการทดลองเพื่อกำหนดวิธีการปรับข้อมูลที่เหมาะสมที่ใช้
ในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 1 ตัวแปรนำออก คือ การหดตัวของ
เส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัด (ดังแสดงในตารางที่ 26) โดยนำจำนวนตัวแปรนำเข้าที่เหมาะสมจาก
ผลการทดลองที่ 11 จากนั้นทำการเปรียบเทียบการปรับข้อมูลให้อยู่ในช่วง 0-1 กับการไม่ปรับ
ข้อมูลและใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียวที่มีตัวแปรมี 2 ระดับ กำหนดให้เป็นการ
ทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์

การทดลองที่ 13 เพื่อกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ และจำนวนรอบที่เหมาะสม
ในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 1 ตัวแปรนำออก

การทดลองที่ 13 เป็นการทดลอง เพื่อกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ และจำนวนรอบ
ที่เหมาะสมในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน และ 1 ตัวแปรนำออก คือ การหดตัว
ของเส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัด (ดังแสดงในตารางที่ 27) โดยใช้วิธีการจัดการข้อมูลจากการทดลอง
ที่ 12 และใช้ตัวแปรหลักทั้งหมด 2 ตัวแปร และมีระดับของตัวแปร 3 ระดับ แผนการทดลองที่
เหมาะสมกับการทดลองนี้ คือ การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบผลกระทบคงที่
เมื่อมีตัวแปร 3 ระดับ และกำหนดให้เป็นการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์

**การทดลองที่ 14 เพื่อกำหนดจำนวนนิรอนในชั้นช่อนที่เหมาะสมในการฝึกหัด
เครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นช่อน และ 1 ตัวแปรนำออก**

การทดลองที่ 14 เป็นการทดลองเพื่อกำหนดจำนวนนิรอนในชั้นช่อนที่เหมาะสมในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นช่อน และ 1 ตัวแปรนำออก คือ การหัดตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัด (ดังแสดงในตารางที่ 28) โดยใช้องค์ประกอบภายในที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 13 และใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียวที่มีตัวแปร 9 ระดับ กำหนดให้เป็นการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์

**การทดลองที่ 15 เพื่อกำหนดนิรอนในชั้นช่อนที่ 2 ที่เหมาะสมในการฝึกหัด
เครือข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นช่อน และ 1 ตัวแปรนำออก**

การทดลองที่ 15 เป็นการทดลองเพื่อกำหนดนิรอนในชั้นช่อนที่ 2 ที่เหมาะสมในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นช่อน และ 1 ตัวแปรนำออก คือ การหัดตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัด ที่ให้ค่าความแม่นยำเฉลี่ยสูงสุด (ดังแสดงในตารางที่ 29) โดยนำผลจากการทดลองที่ 14 มาเป็นตัวกำหนดจำนวนนิรอนน้อยที่สุดและมากที่สุดที่ใช้ในการทดลองที่ 15 และใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียวที่มีตัวแปร 18 ระดับ โดยกำหนดให้เป็นการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์

ตารางที่ 15 แผนการทดลองที่ 1

แผนการทดลองเพื่อกำหนดจำนวนตัวแปรนำเข้าที่เหมาะสม		
1. วัตถุประสงค์	เพื่อกำหนดจำนวนตัวแปรนำเข้าที่เหมาะสม	
2. ข้อมูลพื้นฐาน	ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแม่นยำของเครือข่ายประสาทเทียม	
3. ตัวแปรต่างๆ ในการทดลอง		
3.1 ตัวแปรตอบสนอง	ค่าที่วัด	
ความแม่นยำเฉลี่ย (average accuracy)	%	
3.2 ตัวแปร	ระดับ	
จำนวนตัวแปรนำเข้า (number of neuron in input layer)	4	5
3.3 ตัวแปรที่ควบคุม	ค่าที่ควบคุม	
จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน (number of neuron in hidden layer)	11	
อัตราการเรียนรู้ (learning rate)	0.01	
จำนวนรอบ (epoch)	3,000	
ค่าเป้าหมาย (goal)	10^{-5}	
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นซ่อน (transfer function in hidden layer)	Log-sigmoid	
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นเอาต์พุต (transfer function in output layer)	Linear	
4. จำนวนซ้ำ 2 การทดลอง ทำซ้ำ 5 ครั้ง ทั้งหมด 6 การทดลอง		
5. กำหนดเมตริกการออกแบบการทดลอง		
6. วิธีการสุ่ม การสุ่มอย่างสมบูรณ์		
7. บันทึกผลการทดลอง		
8. การวิเคราะห์ผลการทดลอง		
8.1 วิเคราะห์โดยแผนภาพแบบกล่อง (box plot)		
8.2 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)		
9. ระยะเวลาการทดลอง เดือนเมษายน 2549		
10. เวลาทำการทดลอง 9.00-15.00 น.		

ตารางที่ 16 แผนการทดลองที่ 2

แผนการทดลองเพื่อกำหนดวิธีการจัดการข้อมูลที่เหมาะสม		
1. วัตถุประสงค์		
เพื่อกำหนดวิธีการจัดการข้อมูลที่เหมาะสม		
2. ข้อมูลพื้นฐาน		
ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแม่นยำของเครือข่ายประสาทเทียม		
3. ตัวแปรต่างๆ ในการทดลอง		
3.1 ตัวแปรตอบสนอง		ค่าที่วัด
ความแม่นยำเฉลี่ย		%
3.2 ตัวแปร		ระดับ
การจัดการข้อมูล	normalization	unnormalization
3.3 ตัวแปรที่ควบคุม		ค่าที่ควบคุม
จำนวนตัวแปรนำเข้า		5
จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน		11
อัตราการเรียนรู้		0.01
จำนวนรอบ		3,000
ค่าเป้าหมาย		10^{-5}
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นซ่อน		log-sigmoid
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นเอาต์พุต		linear
4. จำนวนซ้ำ 2 การทดลอง ทำซ้ำ 5 ครั้ง ทั้งหมด 6 การทดลอง		
5. กำหนดเมตริกการออกแบบการทดลอง		
6. วิธีการสุ่ม การสุ่มอย่างสมบูรณ์		
7. บันทึกผลการทดลอง		
8. การวิเคราะห์ผลการทดลอง		
8.1 วิเคราะห์โดยแผนภาพแบบกล่อง		
8.2 วิเคราะห์ความแปรปรวน		
9. ระยะเวลาการทดลอง เดือนเมษายน 2549		
10. เวลาทำการทดลอง 9.00-15.00 น.		

ตารางที่ 17 แผนการทดลองที่ 3

แผนการทดลองเพื่อกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบ				
1. วัตถุประสงค์				
เพื่อกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบที่เหมาะสม				
2. ข้อมูลพื้นฐาน				
ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพเครือข่ายประสาทเทียม				
3. ตัวแปรในการทดลอง				
3.1 ตัวแปรตอบสนอง		ค่าที่วัด		
ความแม่นยำเฉลี่ย		%		
3.2 ตัวแปร		ระดับ		
อัตราการเรียนรู้	0.01	0.05	0.09	
จำนวนรอบ	1,000	3,000	5,000	
3.3 ตัวแปรที่ควบคุม		ค่าที่ควบคุม		
จำนวนนิเวรอนในชั้นซ่อน		11		
จำนวนตัวแปรนำเข้า		5		
ค่าเป้าหมาย		10 ⁻⁵		
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นซ่อน		log-sigmoid		
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นเอาต์พุต		linear		
4. จำนวนซ้ำ การทดลอง 3 ³ = 9 การทดลอง ทำซ้ำ 5 ครั้ง ทั้งหมด 45 การทดลอง				
5. กำหนดเมตริกการออกแบบการทดลอง				
6. วิธีการสุ่ม การสุ่มอย่างสมบูรณ์				
7. บันทึกผลการทดลอง				
8. การวิเคราะห์ผลการทดลอง				
8.1 วิเคราะห์ความแปรปรวน				
9. ระยะเวลาการทดลอง เดือนเมษายน 2549				
10. เวลาทำการทดลอง 9.00-15.00 น.				

ตารางที่ 18 แผนการทดลองที่ 4

แผนการทดลองเพื่อกำหนดจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนที่เหมาะสม	
1. วัตถุประสงค์	
เพื่อเลือกตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแม่นยำของเครือข่ายประสาทเทียม	
2. ข้อมูลพื้นฐาน	
ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแม่นยำของเครือข่ายประสาทเทียม	
3. ตัวแปรต่างๆ ในการทดลอง	
3.1 ตัวแปรตอบสนอง	ค่าที่วัด
ความแม่นยำเฉลี่ย	%
3.2 ตัวแปร	ระดับ
จำนวนนิรอนในชั้นซ่อน	3,4,5,...,10,11
3.3 ตัวแปรที่ควบคุม	ค่าที่ควบคุม
จำนวนตัวแปรนำเข้า	5
อัตราการเรียนรู้	0.01
จำนวนรอบ	1,000
ค่าเป้าหมาย	10^{-5}
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นซ่อน	Log-sigmoid
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นเอาต์พุต	Linear
4. จำนวนซ้ำ 9 การทดลอง ทำซ้ำ 5 ครั้ง ทั้งหมด 45 การทดลอง	
5. เมตริกการออกแบบการทดลอง	
6. วิธีการสุ่ม การสุ่มอย่างสมบูรณ์	
7. บันทึกผลการทดลอง	
8. การวิเคราะห์ผลการทดลอง	
8.1 วิเคราะห์ความแปรปรวน	
8.2 วิเคราะห์ความแตกต่างนัยสำคัญน้อยสุด	
9. ระยะเวลาการทดลอง เดือนเมษายน 2549	
10. เวลาทำการทดลอง 9.00-15.00 น.	

ตารางที่ 19 แผนการทดลองที่ 5

แผนการทดลองเพื่อกำหนดนิรอนในชั้นช่อนที่ 2 ที่เหมาะสมในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นช่อน และ 2 ตัวแปรนำออก	
1. วัตถุประสงค์	
เพื่อกำหนดนิรอนในชั้นช่อนที่ 2 ที่เหมาะสม	
2. ข้อมูลพื้นฐาน	
ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแม่นยำของเครือข่ายประสาทเทียม	
3. ตัวแปรต่างๆ ในการทดลอง	
3.1 ตัวแปรตอบสนอง	ค่าที่วัด
ความแม่นยำเฉลี่ย	%
3.2 ตัวแปร	ระดับ
จำนวนนิรอนในชั้นช่อนที่ 2	6,7,8,...,20,21
3.3 ตัวแปรที่ควบคุม	ค่าที่ควบคุม
จำนวนตัวแปรนำเข้า	5
จำนวนนิรอนในชั้นช่อนที่ 1	10
อัตราการเรียนรู้	0.01
จำนวนรอบ	1000
ค่าเป้าหมาย	10^{-5}
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นช่อน	log-sigmoid
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นเอาต์พุต	Linear
4. จำนวนซ้ำ 16 การทดลอง ทำซ้ำ 5 ครั้ง ทั้งหมด 80 การทดลอง	
5. เมตริกการออกแบบการทดลอง	
6. วิธีการสุ่ม การสุ่มอย่างสมบูรณ์	
7. บันทึกผลการทดลอง	
8. การวิเคราะห์ผลการทดลอง	
8.1 วิเคราะห์ความแปรปรวน	
8.2 วิเคราะห์ความแตกต่างนัยสำคัญน้อยสุด	
9. ระยะเวลาการทดลอง เดือนเมษายน 2549	
10. เวลาทำการทดลอง 9.00-15.00 น.	

ตารางที่ 20 แผนการทดลองที่ 6

แผนการทดลองเพื่อกำหนดจำนวนตัวแปรนำเข้าที่เหมาะสม		
1. วัตถุประสงค์	เพื่อกำหนดจำนวนตัวแปรนำเข้าที่เหมาะสม	
2. ข้อมูลพื้นฐาน	ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแม่นยำของเครือข่ายประสาทเทียม	
3. ตัวแปรต่างๆ ในการทดลอง		
3.1 ตัวแปรตอบสนอง	ค่าที่วัด	
ความแม่นยำ	%	
3.2 ตัวแปร	ระดับ	
จำนวนตัวแปรนำเข้า	4	5
3.3 ตัวแปรที่ควบคุม	ค่าที่ควบคุม	
จำนวนนิเวศในชั้นซ่อน	11	
อัตราการเรียนรู้	0.01	
จำนวนรอบ	3,000	
ค่าเป้าหมาย	10^{-5}	
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นซ่อน	log-sigmoid	
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นเอาต์พุต	linear	
4. จำนวนซ้ำ 2 การทดลอง ทำซ้ำ 5 ครั้ง ทั้งหมด 10 การทดลอง		
5. กำหนดเมตริกการออกแบบการทดลอง		
6. วิธีการสุ่ม การสุ่มอย่างสมบูรณ์		
7. บันทึกผลการทดลอง		
8. การวิเคราะห์ผลการทดลอง		
8.1 วิเคราะห์โดยแผนภาพแบบกล่อง		
8.2 วิเคราะห์ความแปรปรวน		
9. ระยะเวลาการทดลอง เดือนเมษายน 2549		
10. เวลาทำการทดลอง 9.00-15.00 น.		

ตารางที่ 21 แผนการทดลองที่ 7

แผนการทดลองเพื่อกำหนดวิธีการจัดการข้อมูลที่เหมาะสม		
1. วัตถุประสงค์		
เพื่อกำหนดวิธีการจัดการข้อมูลที่เหมาะสม		
2. ข้อมูลพื้นฐาน		
ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแม่นยำของเครือข่ายประสาทเทียม		
3. ตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลอง		
3.1 ตัวแปรตอบสนอง	ค่าที่วัด	
ความแม่นยำ	%	
3.2 ตัวแปร	ระดับ	
วิธีการจัดการข้อมูล	normalization	unnormalization
3.3 ตัวแปรที่ควบคุม	ค่าที่ควบคุม	
จำนวนตัวแปรนำเข้า	5	
จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน	11	
อัตราการเรียนรู้	0.01	
จำนวนรอบ	3000	
ค่าเป้าหมาย	10^{-5}	
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นซ่อน	log-sigmoid	
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นเอาต์พุต	linear	
4. จำนวนซ้ำ 2 การทดลอง ทำซ้ำ 3 ครั้ง ทั้งหมด 6 การทดลอง		
5. กำหนดเมตริกการออกแบบการทดลอง		
6. วิธีการสุ่ม การสุ่มอย่างสมบูรณ์		
7. บันทึกผลการทดลอง		
8. การวิเคราะห์ผลการทดลอง		
8.1 วิเคราะห์โดยแผนภาพแบบกล่อง		
8.2 วิเคราะห์ความแปรปรวน		
9. ระยะเวลาการทดลอง เดือนเมษายน 2549		
10. เวลาทำการทดลอง 9.00-15.00 น.		

ตารางที่ 22 แผนการทดลองที่ 8

แผนการทดลองเพื่อกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ และจำนวนรอบ				
1. วัตถุประสงค์				
เพื่อกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบที่เหมาะสม				
2. ข้อมูลพื้นฐาน				
ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพเครือข่ายประสาทเทียม				
3. ตัวแปรต่างๆ ในการทดลอง				
3.1 ตัวแปรตอบสนอง		ค่าที่วัด		
ความแม่นยำ		%		
3.2 ตัวแปร		ระดับ		
อัตราการเรียนรู้	0.01	0.05	0.09	
จำนวนรอบ	1,000	3,000	5,000	
3.3 ตัวแปรที่ควบคุม		ค่าที่ควบคุม		
จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน		11		
จำนวนตัวแปรนำเข้า		5		
ค่าเป้าหมาย		10^{-5}		
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นซ่อน		log-sigmoid		
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นเอาต์พุต		linear		
4. จำนวนซ้ำ การทดลอง $3^3 = 9$ การทดลอง ทำซ้ำ 5 ครั้ง ทั้งหมด 45 การทดลอง				
5. กำหนดเมตริกการออกแบบการทดลอง				
6. วิธีการสุ่ม การสุ่มอย่างสมบูรณ์				
7. บันทึกผลการทดลอง				
8. การวิเคราะห์ผลการทดลอง				
8.1 วิเคราะห์ความแปรปรวน				
9. ระยะเวลาการทดลอง เดือนเมษายน 2549				
10. เวลาทำการทดลอง 9.00-15.00 น.				

ตารางที่ 23 แผนการทดลองที่ 9

แผนการทดลองเพื่อกำหนดจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่เหมาะสม	
1. วัตถุประสงค์	
เพื่อกำหนดจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่เหมาะสม	
2. ข้อมูลพื้นฐาน	
ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแม่นยำของเครือข่ายประสาทเทียม	
3. ตัวแปรต่างๆ ในการทดลอง	
3.1 ตัวแปรตอบสนอง	ค่าที่วัด
ความแม่นยำ	%
3.2 ตัวแปร	ระดับ
จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน	3,4,5,...,10,11
3.3 ตัวแปรที่ควบคุม	ค่าที่ควบคุม
จำนวนตัวแปรนำเข้า	5
อัตราการเรียนรู้	0.01
จำนวนรอบ	1,000
ค่าเป้าหมาย	10^{-5}
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นซ่อน	log-sigmoid
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นเอาพุต	linear
4. จำนวนซ้ำ 9 การทดลอง ทำซ้ำ 5 ครั้ง ทั้งหมด 45 การทดลอง	
5. กำหนดเมตริกการออกแบบการทดลอง	
6. วิธีการสุ่ม การสุ่มอย่างสมบูรณ์	
7. บันทึกผลตารางบันทึกผลการทดลอง	
8. การวิเคราะห์ผลการทดลอง	
8.1 วิเคราะห์ความแปรปรวน	
8.2 วิเคราะห์ความแตกต่างนัยสำคัญน้อยสุด	
9. ระยะเวลาการทดลอง เดือนเมษายน 2549	
10. เวลาทำการทดลอง 9.00-15.00 น.	

ตารางที่ 24 แผนการทดลองที่ 10

แผนการทดลองเพื่อกำหนดนิเวศในชั้นช่อนที่ 2	
1. วัตถุประสงค์	
เพื่อกำหนดนิเวศในชั้นช่อนที่ 2 ที่เหมาะสม	
2. ข้อมูลพื้นฐาน	
ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแม่นยำของเครือข่ายประสาทเทียม	
3. ตัวแปรต่างๆ ในการทดลอง	
3.1 ตัวแปรตอบสนอง	ค่าที่วัด
ความแม่นยำเฉลี่ย	%
3.2 ตัวแปร	ระดับ
จำนวนนิเวศในชั้นช่อนที่ 2	6,7,8,...,22,23
3.3 ตัวแปรที่ควบคุม	ค่าที่ควบคุม
จำนวนตัวแปรนำเข้า	5
จำนวนนิเวศในชั้นช่อนที่ 1	11
อัตราการเรียนรู้	0.01
จำนวนรอบ	1,000
ค่าเป้าหมาย	10^{-5}
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นช่อน	log-sigmoid
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นเอาพุต	linear
4. จำนวนซ้ำ 18 การทดลอง ทำซ้ำ 5 ครั้ง ทั้งหมด 90 การทดลอง	
5. กำหนดเมตริกการออกแบบการทดลอง	
6. วิธีการสุ่ม การสุ่มอย่างสมบูรณ์	
7. ตารางบันทึกผลการทดลอง	
8. การวิเคราะห์ผลการทดลอง	
8.1 วิเคราะห์ความแปรปรวน	
8.2 วิเคราะห์ความแตกต่างนัยสำคัญน้อยสุด	
9. ระยะเวลาการทดลอง เดือนเมษายน 2549	
10. เวลาทำการทดลอง 9.00-15.00 น.	

ตารางที่ 25 แผนการทดลองที่ 11

แผนการทดลองเพื่อกำหนดจำนวนตัวแปรนำเข้าที่เหมาะสม		
1. วัตถุประสงค์	เพื่อกำหนดจำนวนตัวแปรนำเข้าที่เหมาะสม	
2. ข้อมูลพื้นฐาน	ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแม่นยำของเครือข่ายประสาทเทียม	
3. ตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลอง		
3.1 ตัวแปรตอบสนอง	ค่าที่วัด	
ความแม่นยำ	%	
3.2 ตัวแปร	ระดับ	
จำนวนตัวแปรนำเข้า	4	5
3.3 ตัวแปรที่ควบคุม	ค่าที่ควบคุม	
จำนวนนิเวศในชั้นซ่อน	11	
อัตราการเรียนรู้	0.01	
จำนวนรอบ	3,000	
ค่าเป้าหมาย	10^{-5}	
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นซ่อน	log-sigmoid	
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นเอาต์พุต	linear	
4. จำนวนซ้ำ 2 การทดลอง ทำซ้ำ 5 ครั้ง ทั้งหมด 10 การทดลอง		
5. กำหนดเมตริกการออกแบบการทดลอง		
6. วิธีการสุ่ม การสุ่มอย่างสมบูรณ์		
7. ตารางบันทึกผลการทดลอง		
8. การวิเคราะห์ผลการทดลอง		
8.1 วิเคราะห์โดยแผนภาพแบบกล่อง		
8.2 วิเคราะห์ความแปรปรวน		
9. ระยะเวลาการทดลอง เดือนเมษายน 2549		
10. เวลาทำการทดลอง 9.00-15.00 น.		

ตารางที่ 26 แผนการทดลองที่ 12

แผนการทดลองเพื่อกำหนดวิธีการจัดการข้อมูลที่เหมาะสม		
1. วัตถุประสงค์		
เพื่อกำหนดวิธีการจัดการข้อมูลที่เหมาะสม		
2. ข้อมูลพื้นฐาน		
ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแม่นยำเฉลี่ยของเครือข่ายประสาทเทียม		
3. ตัวแปรต่างๆ ในการทดลอง		
3.1 ตัวแปรตอบสนอง		ค่าที่วัด
ความแม่นยำ		%
3.2 ตัวแปร		ระดับ
วิธีการจัดการข้อมูล	normalization	unnormalization
3.3 ตัวแปรที่ควบคุม		ค่าที่ควบคุม
จำนวนตัวแปรนำเข้า		5
จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน		11
อัตราการเรียนรู้		0.01
จำนวนรอบ		3000
ค่าเป้าหมาย		10^{-5}
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นซ่อน		log-sigmoid
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นเอาต์พุต		linear
4. จำนวนซ้ำ 2 การทดลอง ทำซ้ำ 5 ครั้ง ทั้งหมด 6 การทดลอง		
5. กำหนดเมตริกการออกแบบการทดลอง		
6. วิธีการสุ่ม การสุ่มอย่างสมบูรณ์		
7. บันทึกผลการทดลอง		
8. การวิเคราะห์ผลการทดลอง		
8.1 วิเคราะห์โดยแผนภาพแบบกล่อง		
8.2 วิเคราะห์ความแปรปรวน		
9. ระยะเวลาการทดลอง เดือนเมษายน 2549		
10. เวลาทำการทดลอง 9.00-15.00 น.		

ตารางที่ 27 แผนการทดลองที่ 13

แผนการทดลองเพื่อกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ และจำนวนรอบ			
1. วัตถุประสงค์			
เพื่อกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบ ที่เหมาะสม			
2. ข้อมูลพื้นฐาน			
ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพเครือข่ายประสาทเทียม			
3. ตัวแปรต่างๆ ในการทดลอง			
3.1 ตัวแปรตอบสนอง		ค่าที่วัด	
ความแม่นยำ		%	
3.2 ตัวแปร		ระดับ	
อัตราการเรียนรู้	0.01	0.05	0.09
จำนวนรอบ	1,000	3,000	5,000
3.3 ตัวแปรที่ควบคุม		ค่าที่ควบคุม	
จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน		11	
จำนวนตัวแปรนำเข้า		5	
ค่าเป้าหมาย		10^{-5}	
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นซ่อน		log-sigmoid	
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นเอาต์พุต		linear	
4. จำนวนซ้ำ การทดลอง $3^3 = 9$ การทดลอง ทำซ้ำ 5 ครั้ง ทั้งหมด 45 การทดลอง			
5. กำหนดเมตริกการออกแบบการทดลอง			
6. วิธีการสุ่ม การสุ่มอย่างสมบูรณ์			
7. บันทึกผลการทดลอง			
8. การวิเคราะห์ผลการทดลอง			
8.1 วิเคราะห์ความแปรปรวน			
9. ระยะเวลาการทดลอง เดือนเมษายน 2549			
10. เวลาทำการทดลอง 9.00-15.00 น.			

ตารางที่ 28 แผนการทดลองที่ 14

แผนการทดลองเพื่อกำหนดจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่เหมาะสม	
1. วัตถุประสงค์	
เพื่อกำหนดจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่เหมาะสม	
2. ข้อมูลพื้นฐาน	
ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแม่นยำของเครือข่ายประสาทเทียม	
3. ตัวแปรต่างๆ ในการทดลอง	
3.1 ตัวแปรตอบสนอง	ค่าที่วัด
ความแม่นยำ	%
3.2 ตัวแปร	ระดับ
จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน	3,4,5,...,10,11
3.3 ตัวแปรที่ควบคุม	ค่าที่ควบคุม
จำนวนตัวแปรนำเข้า	5
อัตราการเรียนรู้	0.01
จำนวนรอบ	1,000
ค่าเป้าหมาย	10^{-5}
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นซ่อน	log-sigmoid
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นเอาพุต	linear
4. จำนวนซ้ำ 9 การทดลอง ทำซ้ำ 5 ครั้ง ทั้งหมด 45 การทดลอง	
5. กำหนดเมตริกการออกแบบการทดลอง	
6. วิธีการสุ่มการสุ่มอย่างสมบูรณ์	
7. บันทึกผลการทดลอง	
8. การวิเคราะห์ผลการทดลอง	
8.1 วิเคราะห์ความแปรปรวน	
8.2 วิเคราะห์ความแตกต่างนัยสำคัญน้อยสุด	
9. ระยะเวลาการทดลอง เดือนเมษายน 2549	
10. เวลาทำการทดลอง 9.00-15.00 น.	

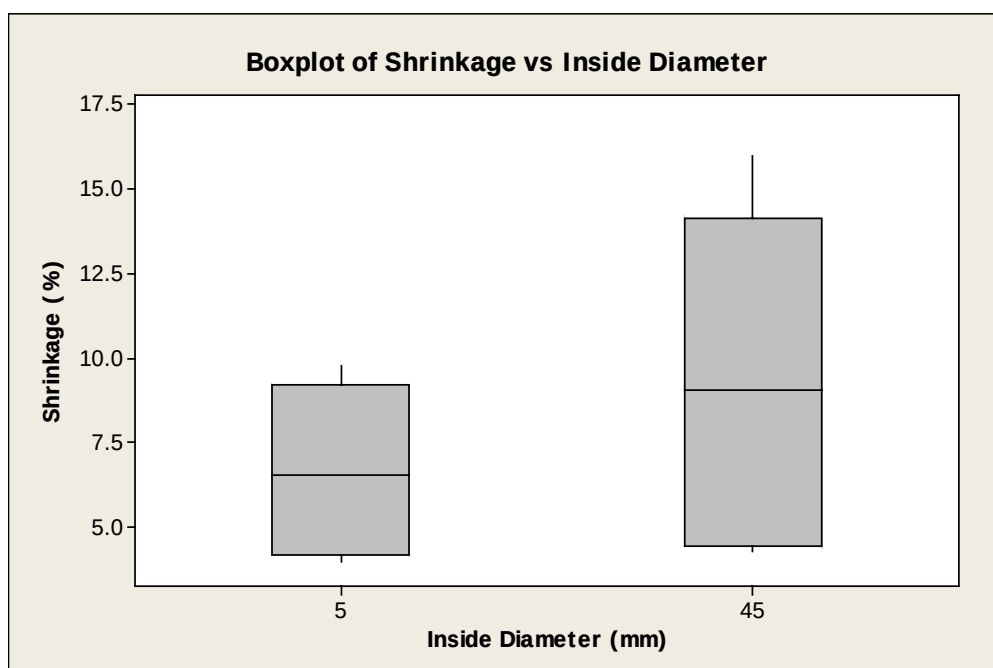
ตารางที่ 29 แผนการทดลองที่ 15

แผนการทดลองเพื่อกำหนดนิเวรอนในชั้นซ่อนที่ 2	
1. วัตถุประสงค์	
เพื่อกำหนดนิเวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 ที่เหมาะสม	
2. ข้อมูลพื้นฐาน	
ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแม่นยำเฉลี่ยของเครือข่ายประสาทเทียม	
3. ตัวแปรต่างๆ ในการทดลอง	
3.1 ตัวแปรตอบสนอง	ค่าที่วัด
ความแม่นยำเฉลี่ย (Average Accuracy)	%
3.2 ตัวแปร	ระดับ
จำนวนนิเวรอนในชั้นซ่อนที่ 2	6,7,8,...,22,23
3.3 ตัวแปรที่ควบคุม	ค่าที่ควบคุม
จำนวนตัวแปรนำเข้า	5
จำนวนนิเวรอนในชั้นซ่อนที่ 1	11
อัตราการเรียนรู้	0.01
จำนวนรอบ	1,000
ค่าเป้าหมาย	10^{-5}
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นซ่อน	log-sigmoid
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในชั้นเอาพุต	linear
4. จำนวนซ้ำ 18 การทดลอง ทำซ้ำ 5 ครั้ง ทั้งหมด 90 การทดลอง	
5. กำหนดเมตริกการออกแบบการทดลอง	
6. วิธีการสุ่ม การสุ่มอย่างสมบูรณ์	
7. บันทึกผลการทดลอง	
8. การวิเคราะห์ผลการทดลอง	
8.1 วิเคราะห์ความแปรปรวน	
8.2 วิเคราะห์ความแตกต่างนัยสำคัญน้อยสุด	
9. ระยะเวลาการทดลอง เดือนเมษายน 2549	
10. เวลาทำการทดลอง 9.00-15.00 น.	

6.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของการทดลองเพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดของ เครือข่ายประสาทเทียมในการทำนายการหดตัว

6.6.1 การอธิบายความผันแปรด้วยแผนภาพแบบกล่อง

แผนภาพแบบกล่อง (ดังแสดงในภาพที่ 49) มีประโยชน์มาก ในการนำเสนอข้อมูล แผนภาพแบบกล่องจะแสดงค่าต่ำสุดและสูงสุดของข้อมูลที่ตำแหน่ง เปอร์เซ็นไทล์ที่ 25 และ 75 และค่ามัธยฐาน (median) อยู่บนแผนภาพสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ถูกจัดวางตามแนวนอนหรือตั้ง ขอบของกล่องด้านล่างจะเป็นควอนไทล์ (quantile) ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดที่ลากผ่านกล่อง คือค่า มัธยฐาน ส่วนปลายของเส้นที่ลากขึ้นไปเหนือกล่องและใต้กล่องคือค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดตาม ลำดับ



ภาพที่ 49 ตัวอย่างแผนภาพแบบกล่อง

6.6.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยทางเดียว

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดของเครือข่ายประสาทเทียม ในการทำนายการหดตัวของเส้นผ่านศูนย์กลาง (ดังแสดงในตารางที่ 30) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 44-46

ตารางที่ 30 ตัวอย่างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียว แบบจำลองผลกระทบคงที่

source of variance	sum of squares	degree of freedom	mean square	F_0
between treatment	$SS_{\text{Treatment}}$	a-1	$MS_{\text{Treatment}}$	$F_0 = \frac{MS_{\text{Treatment}}}{MS_E}$
error (with in treatment)	SS_E	N-a	MS_E	
total	SS_T	N-1		

โดยที่

$$SS_{\text{Treatment}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a y_i^2 - \frac{y_{..}^2}{N} \quad (44)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} \quad (45)$$

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{Treatment}} \quad (46)$$

ในการพิจารณาถึงตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพเครือข่ายประสาทเทียม ในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติส่วนใหญ่ จะคำนวณค่า P value ออกมาให้ ซึ่งในการพิจารณาค่า P value จะทำการเปรียบเทียบกับค่า α ถ้าค่า P value ที่คำนวณได้ในแต่ละตัวแปร ถ้ามีค่าน้อยกว่าค่า α แสดงว่าตัวแปรนั้นมีผลต่อการหดตัว แต่ถ้าค่า P value ที่คำนวณได้ในแต่ละตัวแปร มีค่ามากกว่าค่า α แสดงว่าตัวแปรนั้นไม่มีผลต่อประสิทธิภาพเครือข่ายประสาทเทียม สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่า α มีค่าเท่ากับ 0.05

6.6.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดของเครือข่ายประสาทเทียม ในการทำนายการหดตัวของเส้นผ่านศูนย์กลาง (ดังแสดงในตารางที่ 31) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 47-52

ตารางที่ 31 ตัวอย่างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย แบบจำลองผลกระทบคงที่

source of variance	sum of squares	degree of freedom	mean square	F_0
A treatment	SS_A	$a-1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B treatment	SS_B	$b-1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
interaction	SS_{AB}	$(a-1)(b-1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
error	SS_E	$ab(n-1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$	
total	SS_T	$abn-1$		

โดยที่

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (47)$$

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (48)$$

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{.j.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (49)$$

$$SS_{\text{Subtotals}} = \frac{1}{an} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abn} \quad (50)$$

$$SS_{AB} = SS_{\text{Subtotals}} - SS_A - SS_B \quad (51)$$

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{Subtotals}} \quad (52)$$

6.6.4 วิธีความแตกต่างนัยสำคัญน้อยสุด (least significant difference, LSD)

หลังจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยการทดสอบ F ซึ่งสมมติฐานหลักถูกปฏิเสธ เมื่อต้องการที่จะทดสอบว่า $H_0: \mu_i = \mu_j$ ทุก $i \neq j$ ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้สถิติ t ดังแสดงจากสมการที่ 53

$$t_0 = \frac{\bar{y}_i - \bar{y}_j}{\sqrt{MS_E \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)}} \quad (53)$$

ถ้าเป็นการทดสอบแบบ 2 ด้าน คู่ของมัชฌิม μ_i และ μ_j จะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ถ้าหาก $|\bar{y}_i - \bar{y}_j| > t_{\alpha/2, N-a} \sqrt{MS_E \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)}$ ดังนั้นจำนวน LSD คำนวณได้จากสมการที่ 54

$$LSD = t_{\alpha/2, N-a} \sqrt{MS_E \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} \quad (54)$$

เรียกว่า “ความแตกต่างนัยสำคัญน้อยสุด” ถ้าหากการออกแบบเป็นแบบได้ดุล
 ดังนั้น $n_1 = n_2 = n_3 \dots = n_a = n$ และจากสมการที่ 55

$$LSD = t_{\alpha/2, N-a} \sqrt{\frac{2MS_E}{n}} \quad (55)$$

เพื่อใช้วิธี LSD จะเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าสังเกตระหว่างค่าเฉลี่ย
 แต่ละคู่ซึ่งตรงกันกับ LSD ถ้า $\left| \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{j.} \right| > LSD$ สามารถสรุปได้ว่า มัชฌิมของประชากร μ_i
 และ μ_j แตกต่างกัน