หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 5

# โปรแกรมการวิเคราะห์การลัดวงจรโดยวิธีแยกเป็นส่วนย่อย

ในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนของโปรแกรมการวิเคราะห์การลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีแยกเป็นส่วนย่อย พร้อมทั้งแสดงโฟลว์ชาร์ตประกอบ

ขั้นตอนการวิเคราะห์ฯ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของโฟลว์ชาร์ตตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5.1 โดยมีรายละเอียดต่างๆดังนี้

## 5.1 <u>การอ่านข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลัง</u>

ข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์ฯ อ่านจากจอภาพ (Monitor) ของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรมย่อย MPUT.C และ MOVE.C แล้วเก็บข้อมูลเหล่านี้ลงบนดิสต์ (Disk) เพื่อไว้ใช้ในการคำนวณต่อไป ขั้นตอนการอ่านข้อมูลนี้อธิบายดังโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 5.2 สำหรับรายละเอียดของข้อมูลที่อ่านเข้ามามีดังนี้

5.1.1 ข้อมูลเกี่ยวกับระบบ และข้อมูลที่ใช้ในการแสดงผลของโปรแกรมมีดังนี้

NLINE คือ จำนวนสายส่ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ

NBUS คือ จำนวนบัสทั้งหมดในระบบ

FTYPE คือ ชนิดของการลัดวงจร

PHASE คือ เฟสอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณการลัดวงจร

BUS คือ ตำแหน่งของบัสที่เกิดลัดวงจร

QUAN คือ ปริมาณที่ต้องการให้แสดง อาจเป็นค่าปริมาณเฟส หรือค่าปริมาณซีเควนซ์

SOL คือ ผลลัพธ์ที่ต้องการให้แสดง อาจเป็นผลลัพธ์ทั้งหมด หรือเฉพาะค่าในส่วนที่เกี่ยวกับบัสที่เกิดลัดวงจร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1.2 ข้อมูลเกี่ยวกับสายส่ง มีดังนี้

line คือ หมายเลขประจำสายส่ง

D คือ ตัวแปรที่กำหนดหมายเลขของระบบย่อย

bp [line] คือ หมายเลขประจำของสายส่ง

bq [line] คือ หมายเลขประจำบัสอีกบัสหนึ่งของสายส่ง

eq [line] คือ อุปกรณ์ของสายส่ง เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า และสายไฟฟ้า

ty [line] คือ ชนิดของอุปกรณ์ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการต่อลงดินแบบ YG หม้อแปลงไฟฟ้าที่แบงค์กันแบบ YG - YG เป็นต้น

z [line] คือ ลายน์อิมพิแดนซ์ซีเควนซ์บวก

## 5.2 <u>การแบ่งระบบไฟฟ้ากำลังออกเป็นระบบย่อยโดยอัตโนมัติ</u>[6]

ในขั้นตอนนี้โปรแกรมจะทำการแบ่งระบบไฟฟ้ากำลังออกเป็นระบบย่อยต่าง ๆ โดยใช้วิธีไดนามิคโปรแกรมมิ่ง (Dynamic Programming) สำหรับหลักการแบ่งจะยึดหลักว่า เมื่อแบ่งระบบออกเป็นระบบย่อยแล้ว จำนวนหน่วยความจำที่ใช้เก็บข้อมูลของบัสอิมพิแดนซ์เมตริกซ์ ($Z_1$ ) ของแต่ละระบบย่อย และเมตริกซ์เชื่อมโยงระบบย่อย ($Z_4$ ) ให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งขั้นตอนของวิธีไดนามิคโปรแกรมมิ่ง มีรายละเอียดดังนี้

5.2.1 เริ่มต้นแบ่งระบบออกเป็นระบบย่อยต่าง ๆ โดยจัดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่ห่างกันที่สุดอยู่ในแต่ละระบบย่อย และในแต่ละระบบย่อยจะมีจำนวนบัสเท่ากัน

5.2.2 คำนวณจำนวนหน่วยความจำที่จะใช้เก็บข้อมูลของ $Z_1$ และ $Z_4$ จากสมการ

$$C_{11} = n_A^2 + n_B^2 + .......... + n_N^2 + n_S^2 \qquad (5.1)$$

โดยที่ $C_{11}$ คือจำนวนหน่วยความจำที่ต้องใช้เก็บข้อมูลของ $Z_1$ และ $Z_4$

$n_A$, $n_B$ คือ จำนวนบัสในระบบย่อย A, B

$n_S$ คือ จำนวนคัทลายน์

ดังนั้น จำนวนหน่วยความจำที่ต้องใช้เก็บข้อมูลจากการแบ่งครั้งแรก คือ

$$C_o = C_{11}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.3 ทดลองย้ายบัสแต่ละบัส โดยเริ่มต้นจากบัสที่ 2 ไปอยู่ในระบบย่อยต่างๆ แล้วคำนวณจำนวนหน่วยความจำที่ต้องใช้เก็บข้อมูล และบันทึกว่าบัสเหล่านั้นควรอยู่ในระบบย่อยใดจึงจะให้จำนวนหน่วยความจำน้อยที่สุด สำหรับการย้ายบัส P ซึ่งเดิมอยู่ในระบบย่อย i ไปยังระบบย่อย j สมการที่ใช้คำนวณจำนวนหน่วยความจำคือ

$$C_{pj} = (n_{jh}+1)^2 - n_{jh}^2 + (n_{ih}-1)^2 - n_{ih}^2 + (n_{sh}+k_{pj})^2 - n_{sh}^2 \qquad (5.2)$$

โดยที่

$n_{jh}$ คือ จำนวนบัสในระบบย่อย j หลังจากจัดบัส (p-1) อยู่ในระบบย่อย h

$n_{ih}$ คือ จำนวนบัสในระบบย่อย i หลังจากจัดบัส (p-1) อยู่ในระบบย่อย h

$n_{ah}$ คือ จำนวนคัทลายน์หลังจากจัดบัส (p-1) อยู่ในระบบย่อย h

$k_{pj}$ คือ จำนวนคัทลายน์ที่เพิ่มขึ้นจากการย้ายบัส p จากระบบย่อย i ไปยังระบบย่อย j

5.2.4 หลังจากทดลองย้ายไปครบทุกบัสแล้ว จึงจัดให้บัสสุดท้ายอยู่ในระบบย่อย ซึ่งให้จำนวนหน่วยความจำน้อยที่สุด แล้วจัดบัสรองสุดท้ายถัดมาเรื่อย ๆ จึงถึงบัสที่ 2 ลงในระบบย่อยที่ให้จำนวนหน่วยความจำที่น้อยที่สุด ซึ่งข้อมูลนี้ได้จากการทดลองย้ายในขั้นที่ 5.2.3

5.2.5 คำนวณจำนวนหน่วยความจำที่ต้องใช้ใหม่ แล้วเปรียบเทียบกับจำนวนหน่วยความจำที่ใช้จากการจัดครั้งที่ผ่านมาถ้าน้อยกว่าก็กลับไปทำขั้นที่ 5.2.3 ใหม่ ถ้ามากกว่าก็หยุดจัด ซึ่งแสดงว่าจากการจัดครั้งที่ผ่านมาจะให้จำนวนหน่วยความจำน้อยที่สุด

สำหรับรายละเอียดของขั้นตอนในหัวข้อ 5.2 นี้ ได้แสดงในโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 5.3

## 5.3 การสร้างบัสอิมพิแดนซ์เมตริกซ์ และเมตริกซ์เชื่อมโยงระบบย่อย[2],[5]

ในขั้นตอนนี้ โปรแกรมจะทำการสร้างบัสอิมพิแดนซ์เมตริกซ์ (Bus Impedance Matrix) และเมตริกซ์เชื่อมโยงระบบย่อย (Intersubdivision Matrix) ซึ่งมีขั้นตอนโดยละเอียดดังนี้

### 5.3.1 การจัดอิลิเมนต์ในแต่ระบบย่อย

อิลิเมนต์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในโปรแกรมนี้ประกอบด้วย อิมพิแดนซ์ของสายส่ง อิมพิแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า และอิมพิแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งในขั้นตอนนี้โปรแกรมจะจัดแบ่งอิลิเมนต์เหล่านี้ลงในแต่ละระบบย่อย หลังจากนั้นจะทำการเรียงลำดับอิลิเมนต์ในแต่ละระบบย่อยนี้ใหม่ โดยจะเริ่มต้นจากอิลิเมนต์ที่ต่อกับกราวนด์บัสต่าง ๆ ไปสู่อิลิเมนต์ที่ต่ออยู่ต่าง ๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 5.4

### 5.3.2 สร้างบัสอิมพิแดนซ์เมตริกซ์ของแต่ละระบบย่อย

การสร้างบัสอิมพิแดนซ์เมตริกซ์ ($Z_1$) ของแต่ละระบบย่อยดำเนินขั้นตอนตามอัลกอริทึมของ Stagg และ El-Abiad[3] อิลิเมนต์ที่จะนำมาใช้ในการสร้าง $Z_1$ ได้จัดลำดับและแบ่งในแต่ละระบบย่อยไว้เรียบร้อยแล้วในขั้นตอนที่ผ่านมา รายละเอียดในขั้นตอนนี้ได้แสดงในโฟล์-ชาร์ตรูปที่ 5.5

### 5.3.3 สร้างเมตริกซ์เชื่อมโยงระบบย่อย

การสร้างเมตริกซ์เชื่อมโยงระบบย่อย $Z_4$ จะเริ่มต้นจากการสร้างเมตริกซ์ $Z_2$ วิธีการสร้างเมตริกซ์ $Z_2$ จะไม่ใช้ทรานส์ฟอร์มเมชั่นเมตริกซ์ $C_{TC}$ โดยโปรแกรมจะเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของกระแสในคัทลายน์ตามทิศทางของคัทลายน์ที่ได้จากการป้อนข้อมูล วิธี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สร้างเมตริกซ์ $Z_2$ จะใช้วิธีตามหัวข้อ 3.2 ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 5.6 หลังจากสร้างเมตริกซ์ $Z_2$ เสร็จแล้ว โปรแกรมจะทำการสร้างเมตริกซ์ $Z_4$ ซึ่งใช้วิธีตามหัวข้อ 3.2 ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 5.7

5.3.4 สร้างบัสอิมพิแดนซ์เมตริกซ์ของระบบใหญ่ โดยสร้างเฉพาะคอลัมม์ของบัสเกิดลัดวงจร

## 5.4 การวิเคราะห์การลัดวงจร

ในขั้นตอนนี้โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์การลัดวงจรแต่ละชนิด โดยแบ่งออกได้ดังนี้

### 5.4.1 การลัดวงจรชนิดสามสายลงดิน

1.1 สมมุติค่าแรงดันบัสทุกบัสก่อนเกิดลัดวงจร (Pre-Fault Voltage) เท่ากับ 1 P.U. และค่าอิมพิแดนซ์ลัดวงจร (zF) เท่ากับ ศูนย์

1.2 กำหนดหมายเลขบัสที่ต้องการวิเคราะห์การลัดวงจร (บัส P )

1.3 คำนวณค่ากระแสและแรงดันต่าง ๆ

1.3.1 คำนวณกระแสบัส (Bus Current) ของบัสที่เกิดลัดวงจร

IB[0] = 0 (5.3)

IB[1] = Ep / (ZBC[1][P] +zF) (5.4)

IB[2] = 0 (5.5)

1.3.2 คำนวณแรงดันบัส (Bus Voltage)

EB[0][k] = 0 (5.6)

EB[1][k] = Ei -ZBC[1][I]*IB[1] (5.7)

EB[2][k] = 0 (5.8)

1.3.3 คำนวณกระแสในลายน์ (Line Current)

IL[0][i] = 0 (5.9)

IL[1][i] = DV/ zp[1][i] (5.10)

IL[2][i] = 0 (5.11)

1.3.4 ถ้าต้องการแปลงค่ากระแสและแรงดันเป็นค่าปริมาณเฟส ( Phase Quantities) ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 1.6

1.4 ถ้าต้องการวิเคราะห์การลัดวงจรที่บัสอื่น ย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 1.2

1.5 RETURN

1.6 กรณีต้องการแปลงค่ากระแสและแรงดันเป็นค่าปริมาณเฟส (Phase Quantities)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.6.1 แปลงค่ากระแสปริมาณซีเควนซ์ ( Sequence Quantities ) เป็นค่ากระแสปริมาณเฟส (Phase Quantities)

$$I^{a,b,c} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} I^{0,1,2} \qquad (5.12)$$

1.6.2 แปลงค่าแรงดันปริมาณซีเควนซ์ เป็นค่าแรงดันปริมาณเฟส

$$E^{a,b,c} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} E^{0,1,2} \qquad (5.13)$$

1.6.3 ย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 1.4

ซึ่งการทำงานของโปรแกรมแสดงในโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 5.8

5.4.2 การลัดวงจรชนิดสองสาย

2.1 สมมุติค่าแรงดันบัสทุกบัสก่อนเกิดลัดวงจร เท่ากับ 1 P.U. และค่าอิมพิแดนซ์ลัดวงจร (zF) เท่ากับ ศูนย์

2.2 กำหนดหมายเลขบัสที่ต้องการวิเคราะห์การลัดวงจร (บัส P)

2.3 คำนวณค่ากระแสและแรงดันต่าง ๆ (ปกติจะกำหนดให้เกิดลัดวงจรระหว่างเฟส B-C)

2.3.1 คำนวณกระแสบัสของบัสที่เกิดลัดวงจร

IB[0] = 0 (5.14)

$$IB[1] = \frac{Ep}{2ZBC[1][P] + zF} \qquad (5.15))$$

IB[2] = -IB[1] (5.16)

2.3.2 คำนวณแรงดันบัส

EB[0][k] = 0 (5.17)

EB[1][k] = Ei -ZBC[1][I]*IB[1] (5.18)

EB[2][k] = -ZBC[1][I]*IB[2] (5.19)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.3 คำนวณกระแสในลายน์

IL[0][i] = DV/ zp[0][i]0 (5.20)

IL[1][i] = DV/ zp[1][i]0 (5.21)

IL[2][i] = DV/ zp[1][i]0 (5.22)

2.3.4 ถ้าต้องการแปลงค่ากระแสและแรงดันเป็นค่าปริมาณเฟส ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 2.9

2.4 ถ้าต้องการวิเคราะห์การลัดวงจรระหว่างเฟส A-C หรือระหว่างเฟส A-B ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 2.7 - 2.9

2.5 ถ้าต้องการวิเคราะห์การลัดวงจรที่บัสอื่น ย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 2.2

2.6 RETURN

2.7 กรณีต้องการวิเคราะห์การลัดวงจรระหว่างเฟส A-C

2.7.1 คำนวณกระแสบัสของบัสที่เกิดลัดวงจร

IB[0] = 0 (5.23)

$$IB[1] = \frac{Ep}{2ZBC[1][P] + zF} \qquad (5.24)$$

IB[2] = -aIB[1] (5.25)

2.7.2 คำนวณแรงดันบัส

EB[0][k] = 0 (5.26)

EB[1][k] = Ei -ZBC[1][I]*IB[1] (5.27)

EB[2][k] = -ZBC[1][I]*IB[2] (5.28)

2.7.3 คำนวณกระแสในลายน์

IL[0][i] = DV/ zp[0][i]0 (5.29)

IL[1][i] = DV/ zp[1][i]0 (5.30)

IL[2][i] = DV/ zp[1][i]0 (5.31)

2.7.4 ถ้าต้องการแปลงค่ากระแสและแรงดันเป็นค่าปริมาณเฟส ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 2.9

2.7.5 ย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 2.5

2.8 กรณีต้องการวิเคราะห์การลัดวงจรระหว่างเฟส A-B

2.8.1 คำนวณกระแสบัสของบัสที่เกิดลัดวงจร

IB[0] = 0 (5.32)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$IB[1] = \frac{Ep}{2ZBC[1][P] + zF} \quad (5.33)$$

$$IB[2] = -a^2 IB[1] \quad (5.34)$$

2.8.2 คำนวณแรงดันบัส

$$EB[0][k] = 0 \quad (5.35)$$

$$EB[1][k] = Ei - ZBC[1][I]*IB[1] \quad (5.36)$$

$$EB[2][k] = -ZBC[1][I]*IB[2] \quad (5.37)$$

2.8.3 คำนวณกระแสในลายน์

$$IL[0][i] = DV/ zp[0][i]0 \quad (5.38)$$

$$IL[1][i] = DV/ zp[1][i]0 \quad (5.39)$$

$$IL[2][i] = DV/ zp[1][i]0 \quad (5.40)$$

2.8.4 ถ้าต้องการแปลงค่ากระแสและแรงดันเป็นค่าปริมาณเฟส ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 2.9

2.8.5 ย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 2.5

2.9 กรณีต้องการแปลงค่ากระแสและแรงดันเป็นค่าปริมาณเฟส

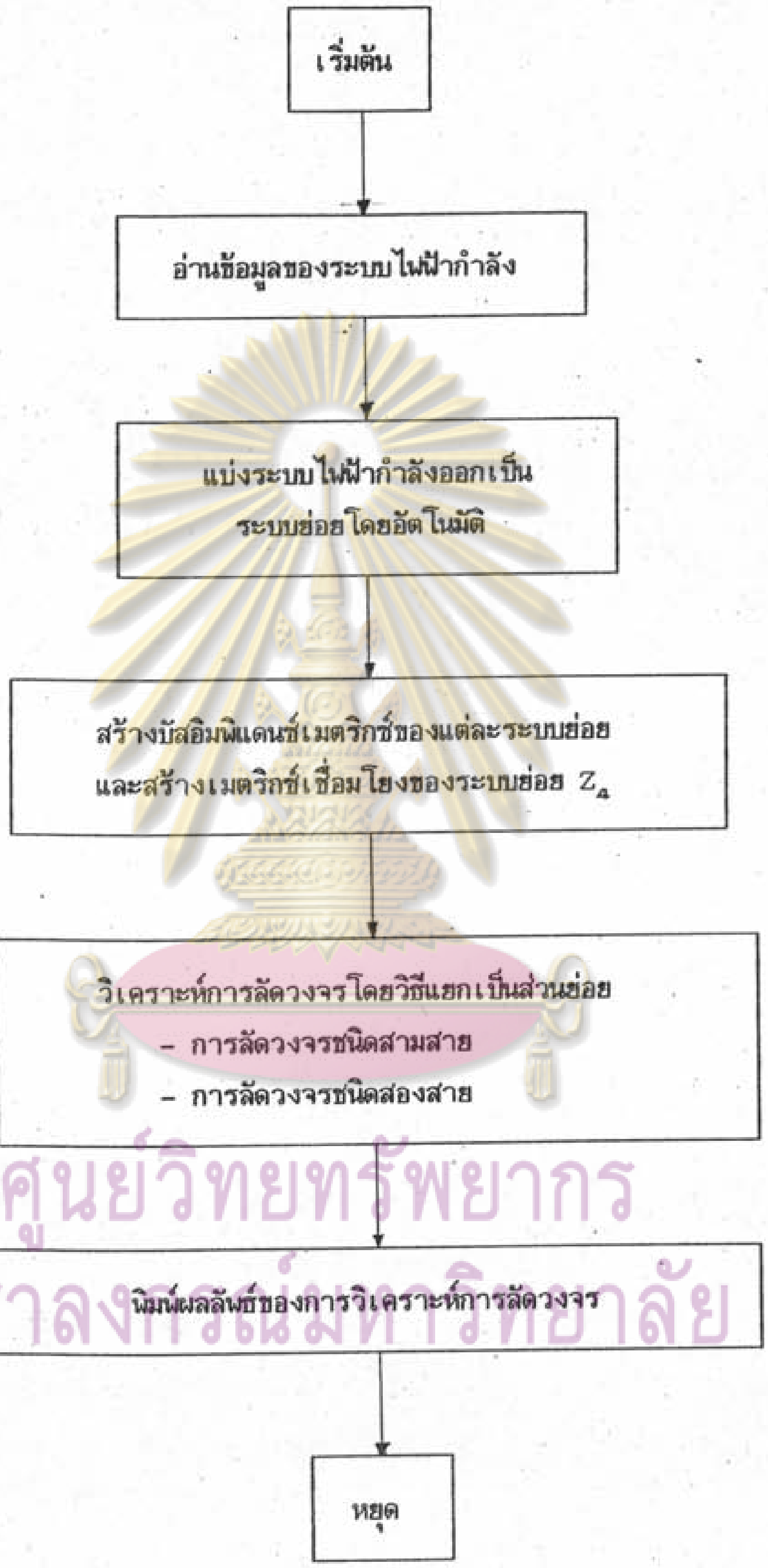
2.9.1 แปลงค่ากระแสปริมาณซีเควนซ์ เป็นค่ากระแสปริมาณเฟส ตามสมการ (5.12)

2.9.2 แปลงค่าแรงดันปริมาณซีเควนซ์ เป็นค่าแรงดันปริมาณเฟส ตามสมการ (5.13)

2.9.3 ย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 2.4

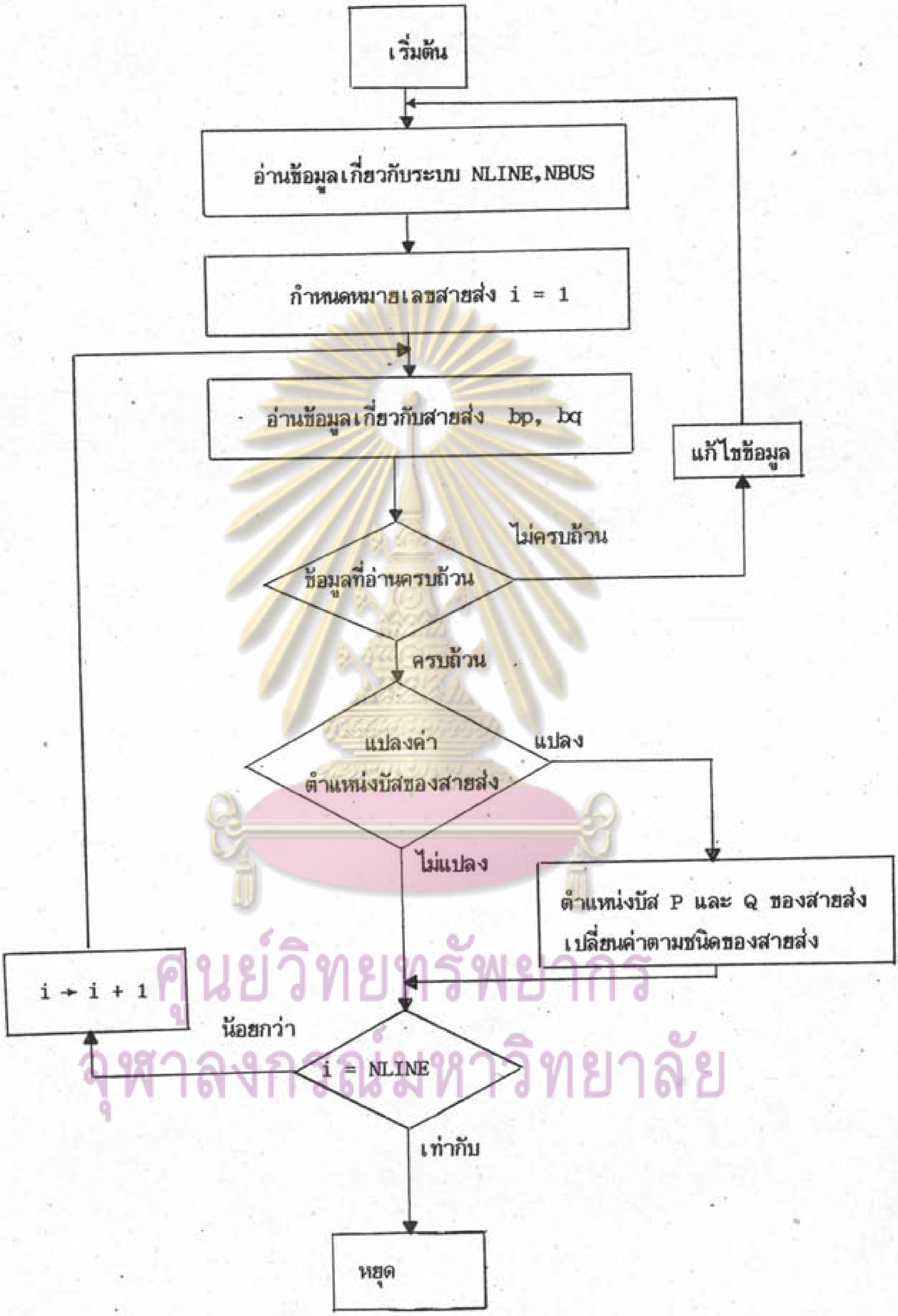
ซึ่งการทำงานของโปรแกรมแสดงในโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 5.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



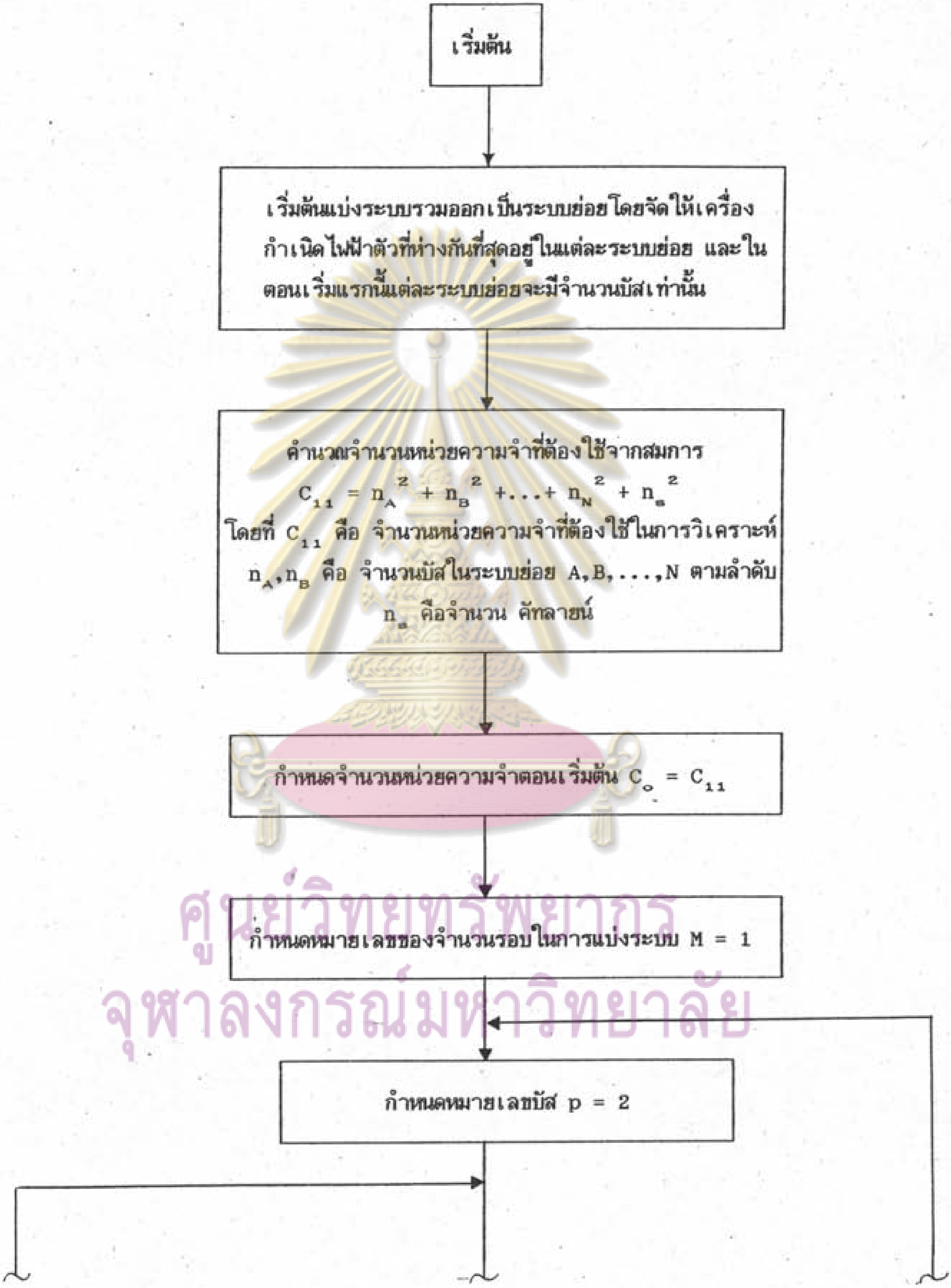

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.1 โฟล์ชาร์ตการวิเคราะห์การลัดวงจร โดยวิธีแยกเป็นส่วนย่อย

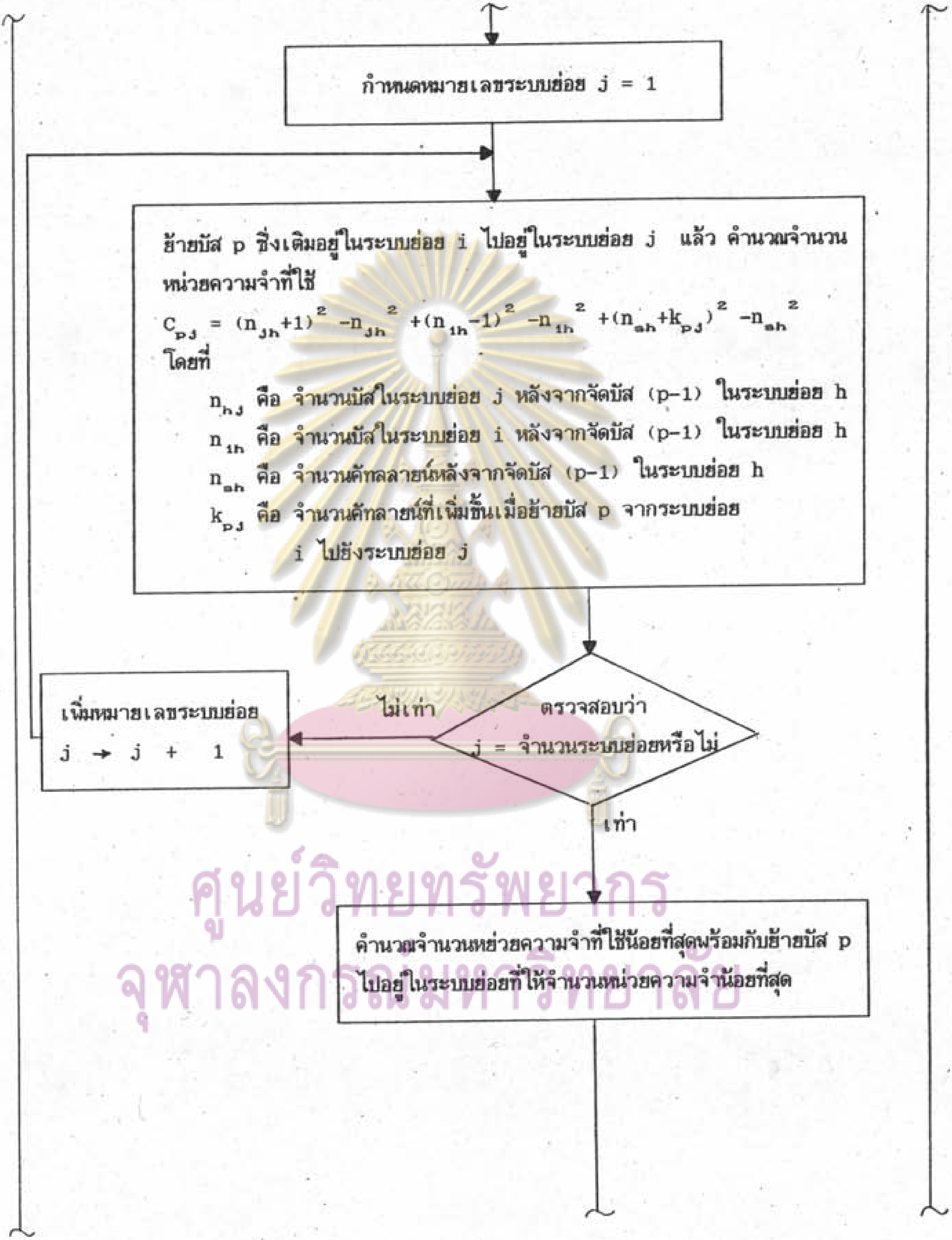



รูปที่ 5.2 โฟลว์ชาร์ตแสดงการอ่านข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลัง

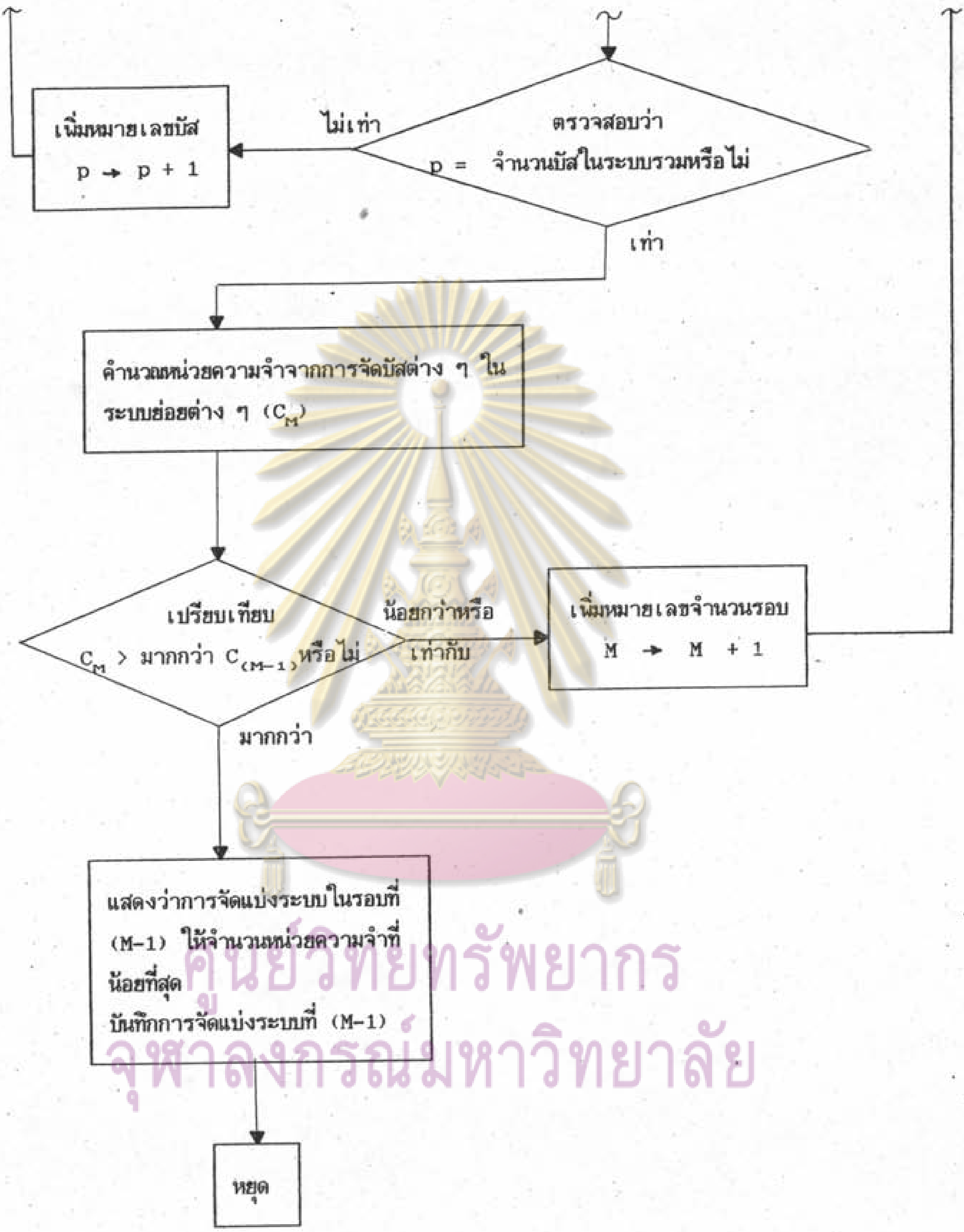
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

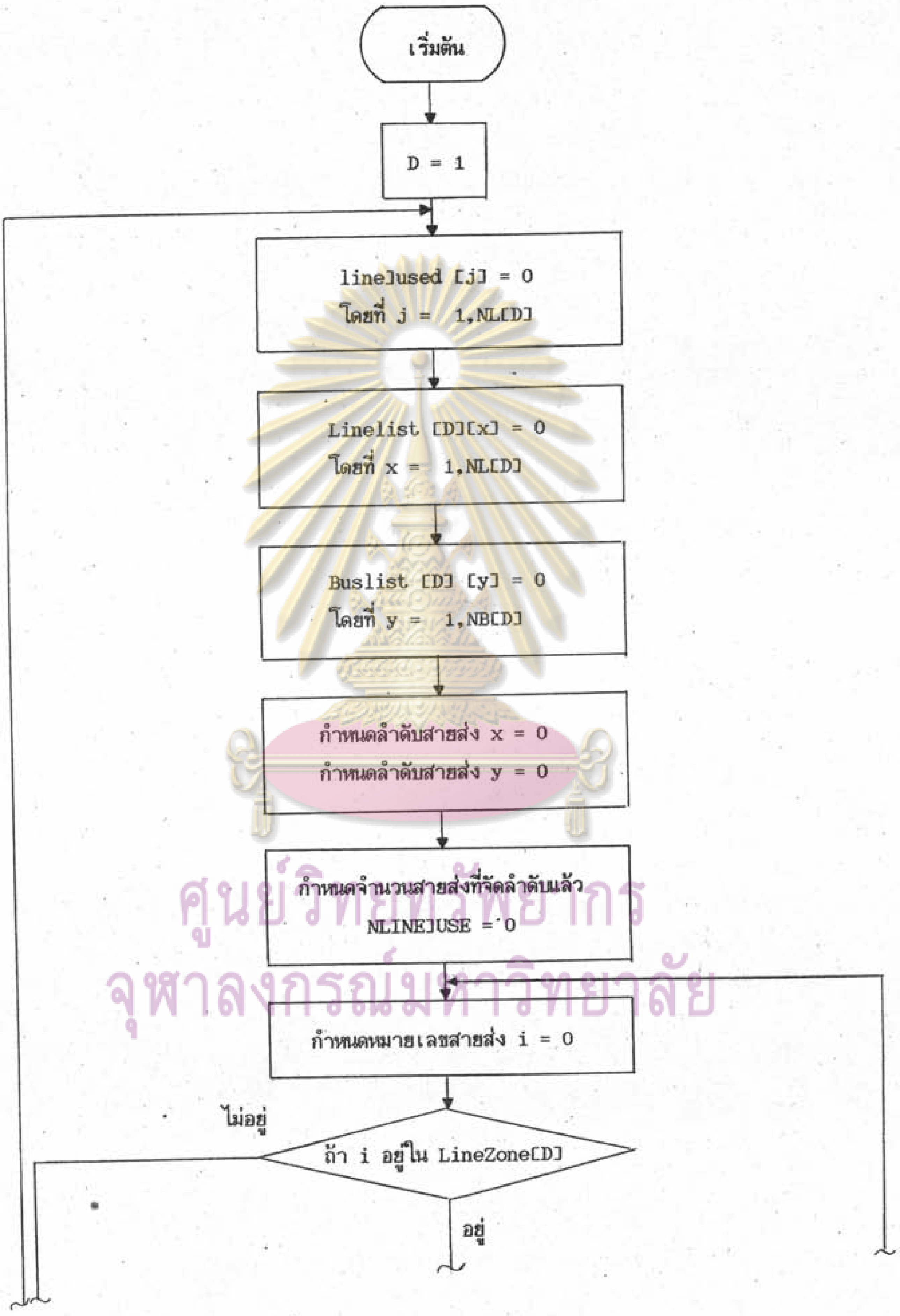



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

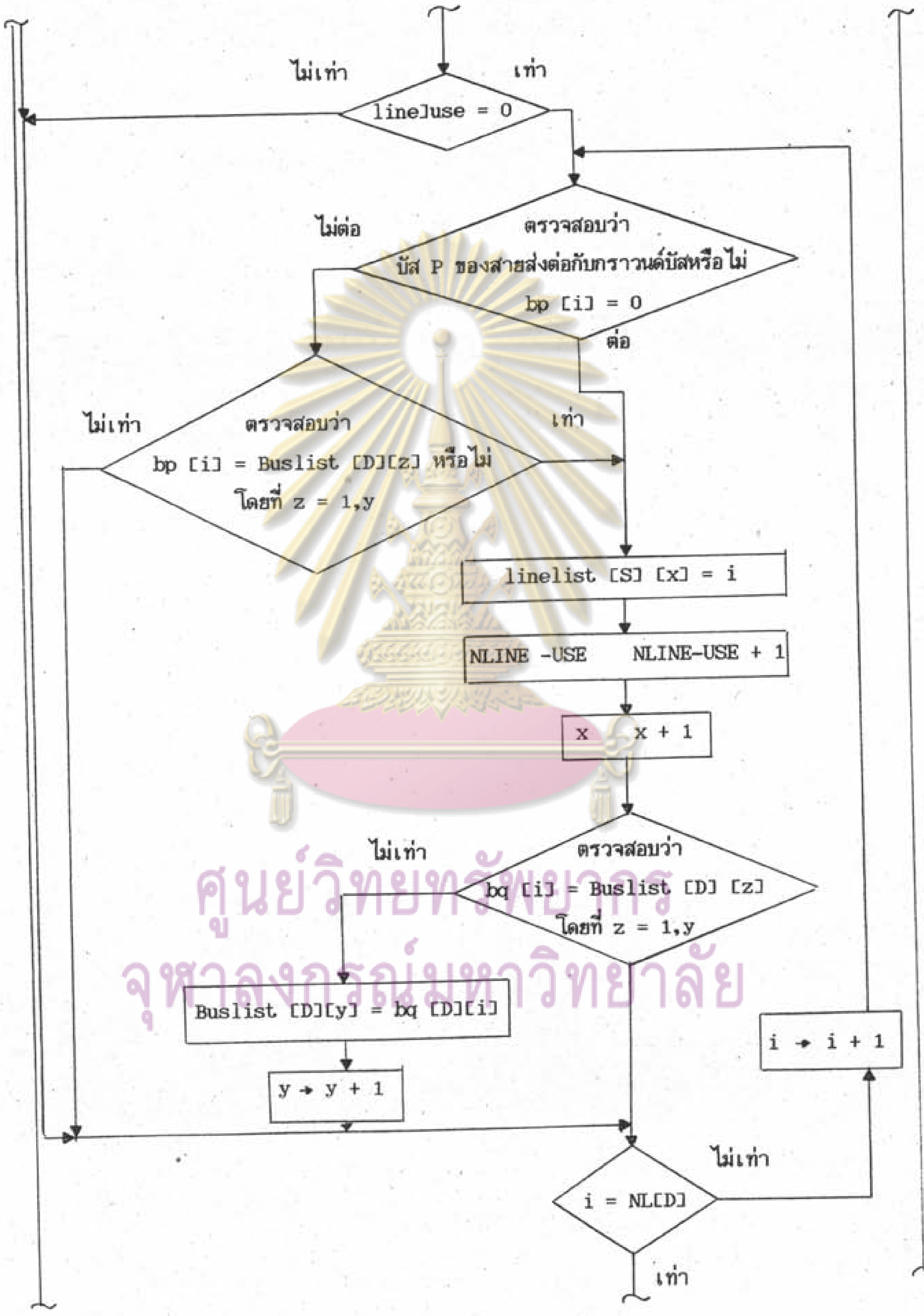



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

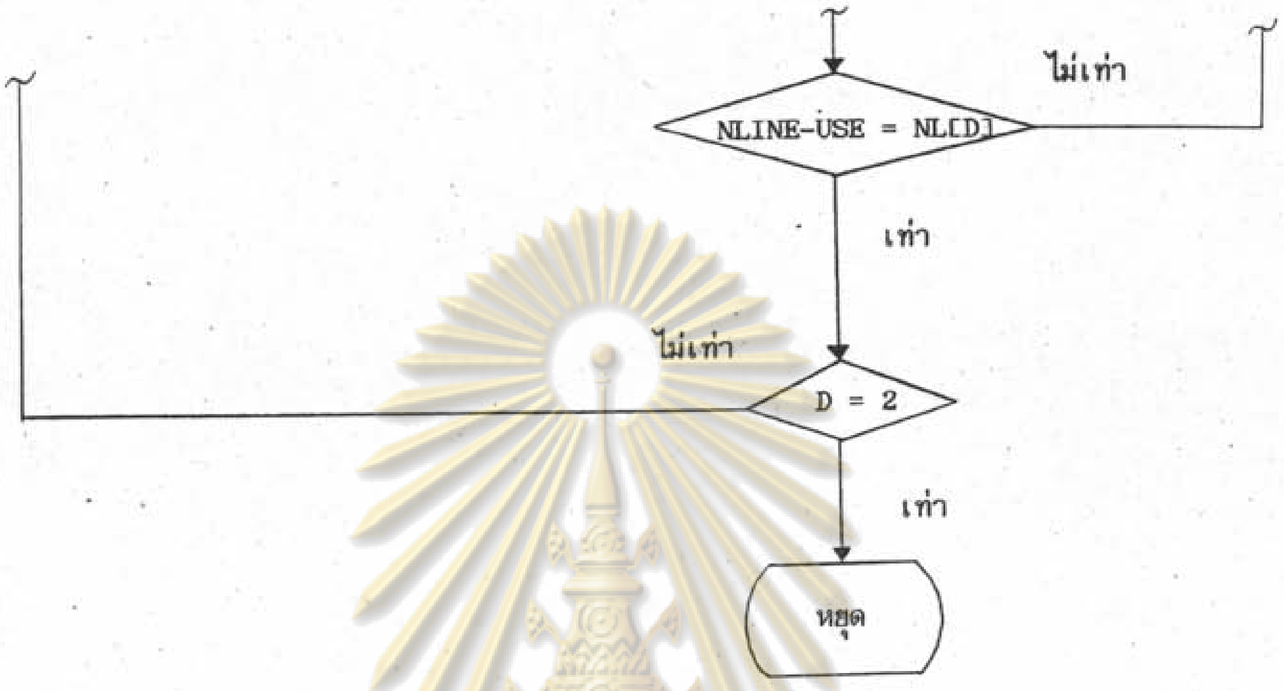
รูปที่ 5.3 แสดงโฟลว์ชาร์ตของการแบ่งระบบไฟฟ้ากำลังเป็นระบบย่อย




ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

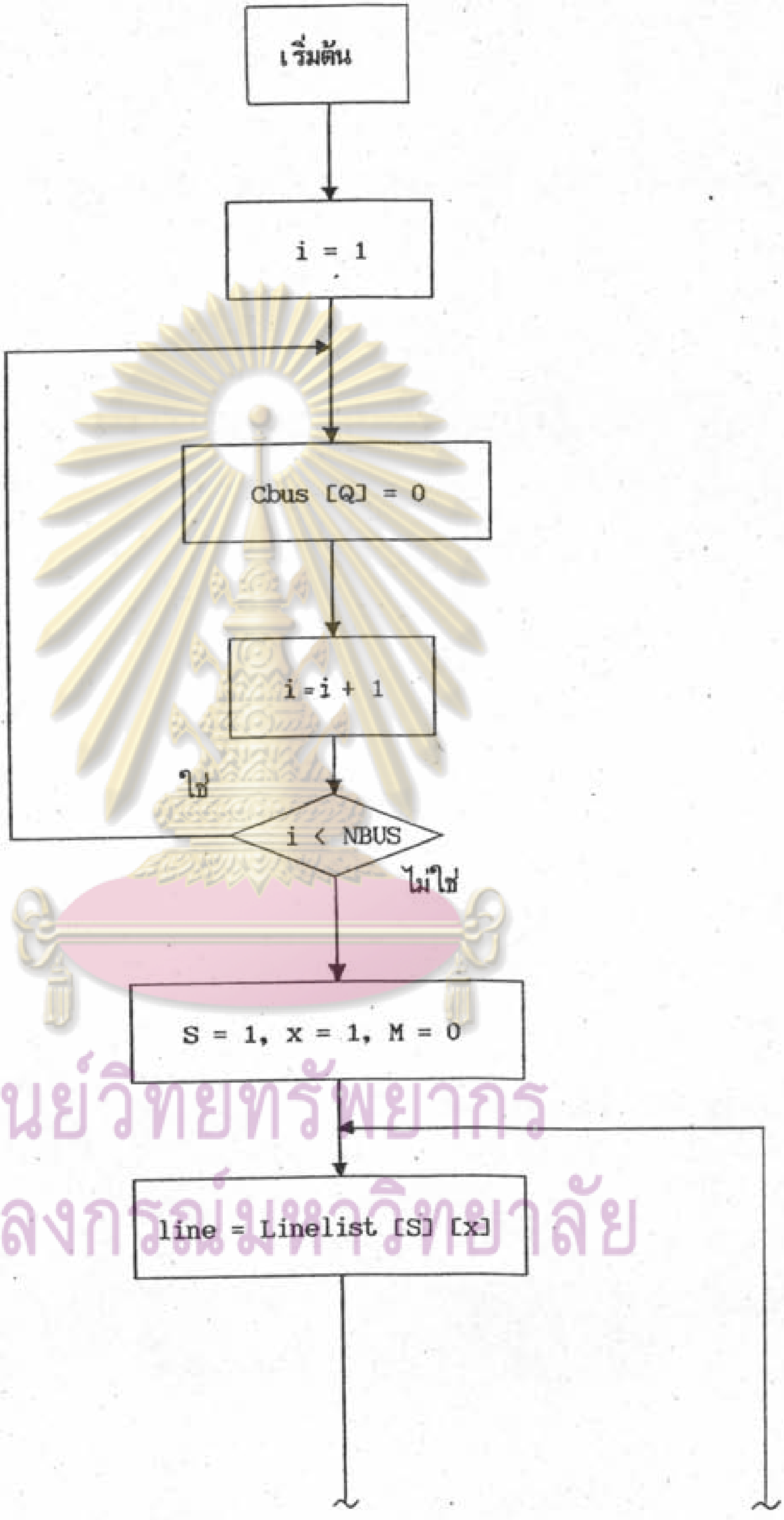



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

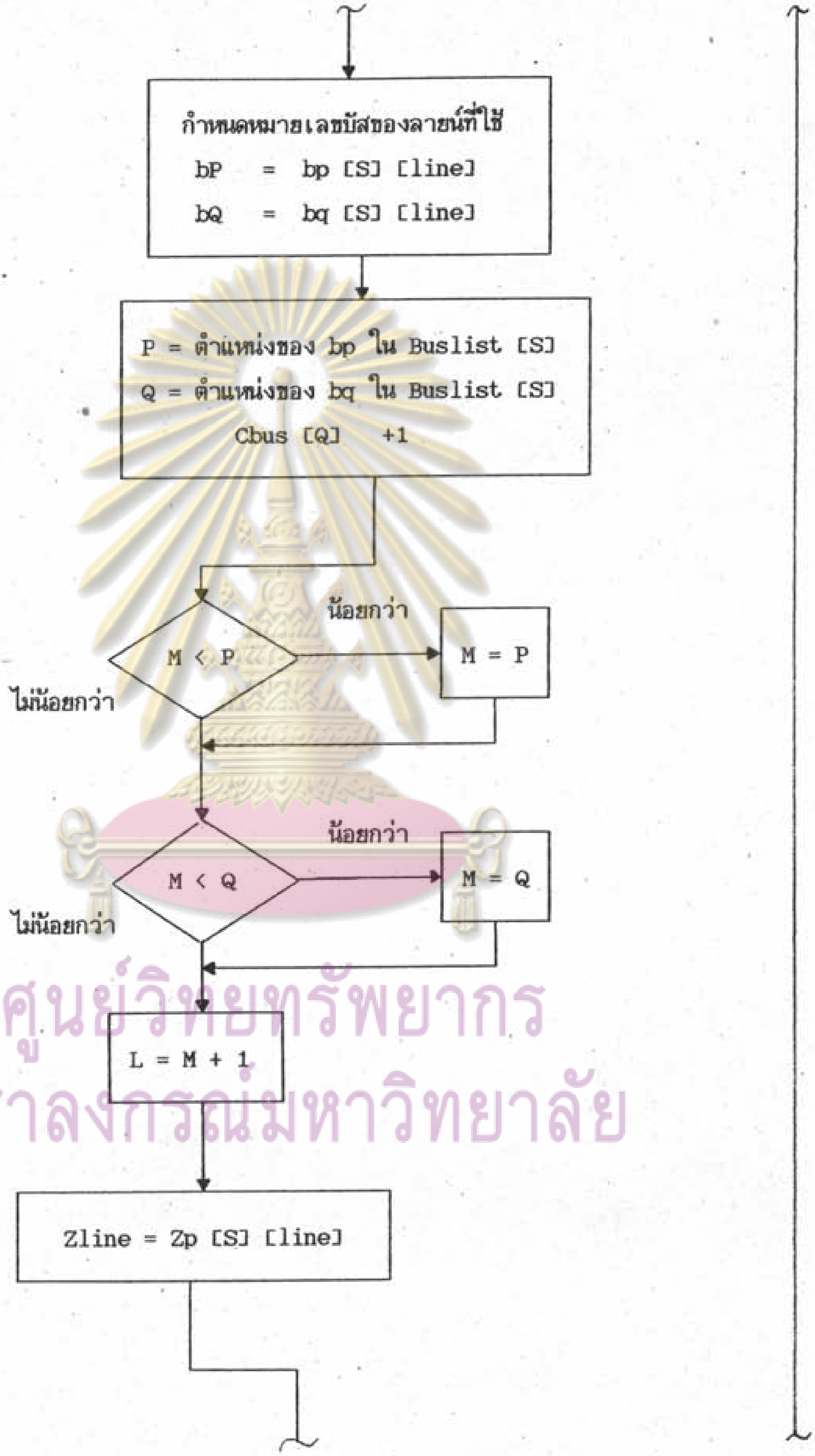



รูปที่ 5.4 โฟลว์ชาร์ตแสดงการจัดลำดับลายน์ที่ใช้ในการคำนวณ

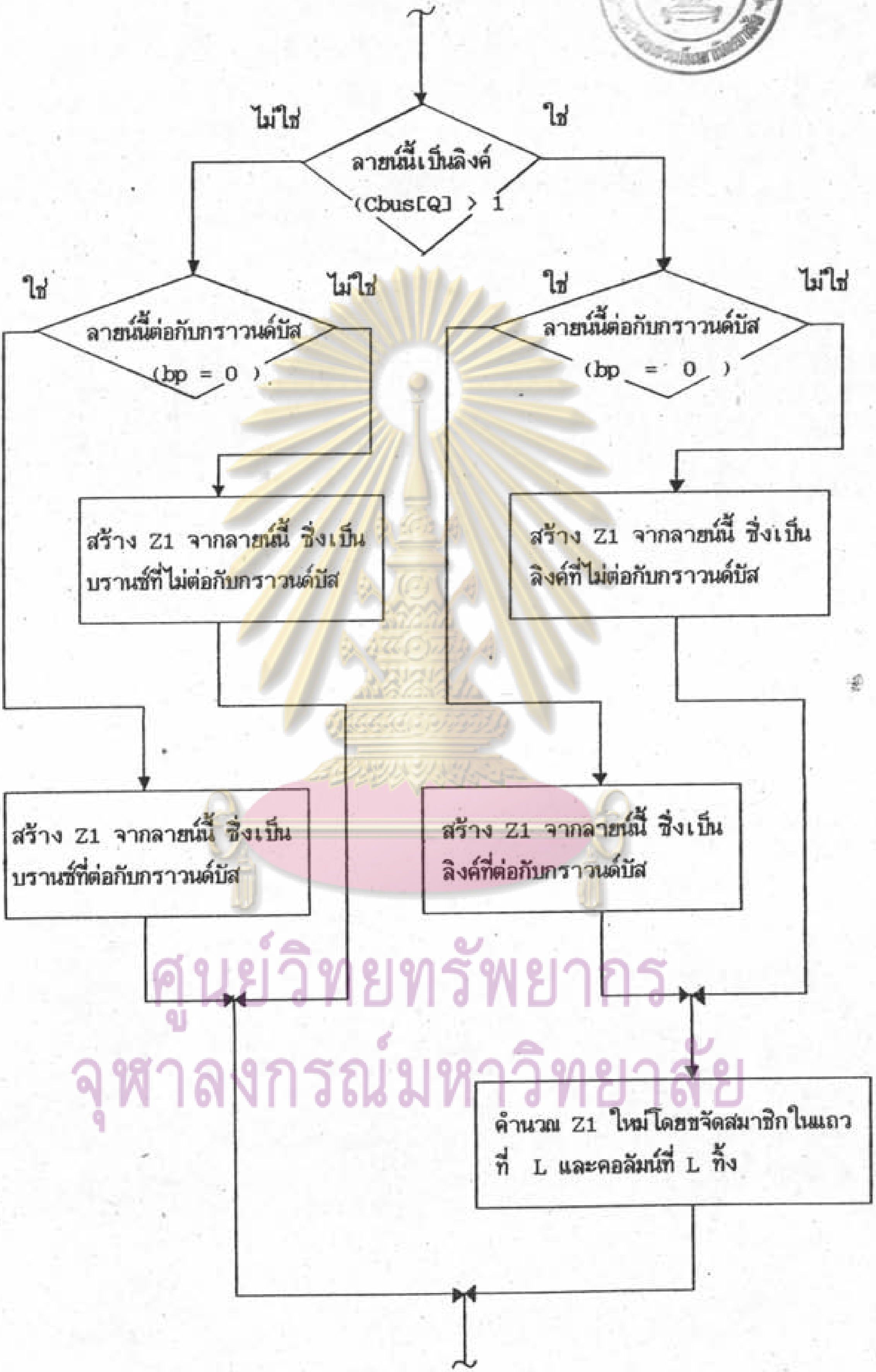
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



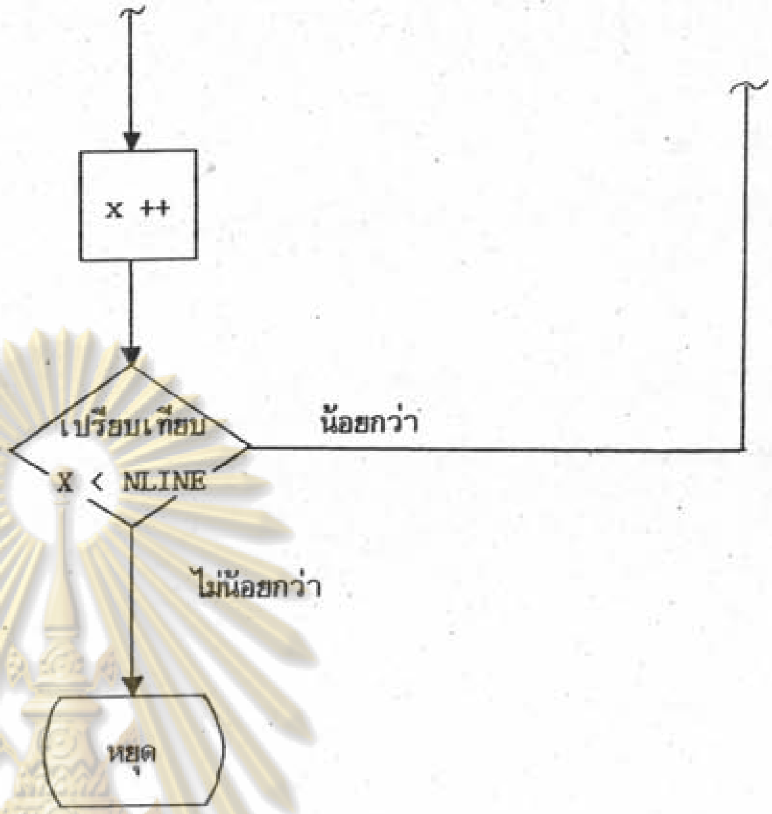

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

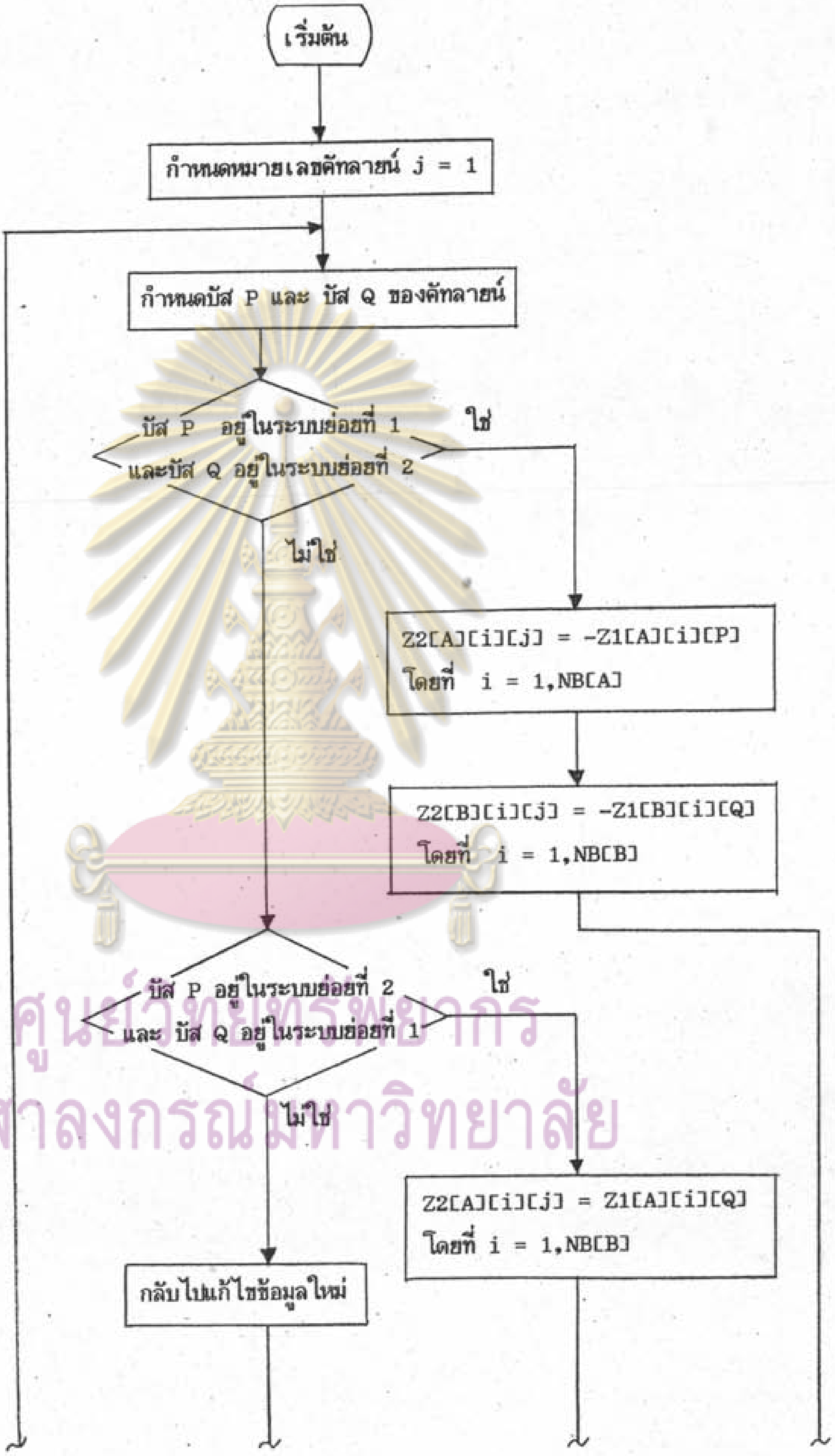



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

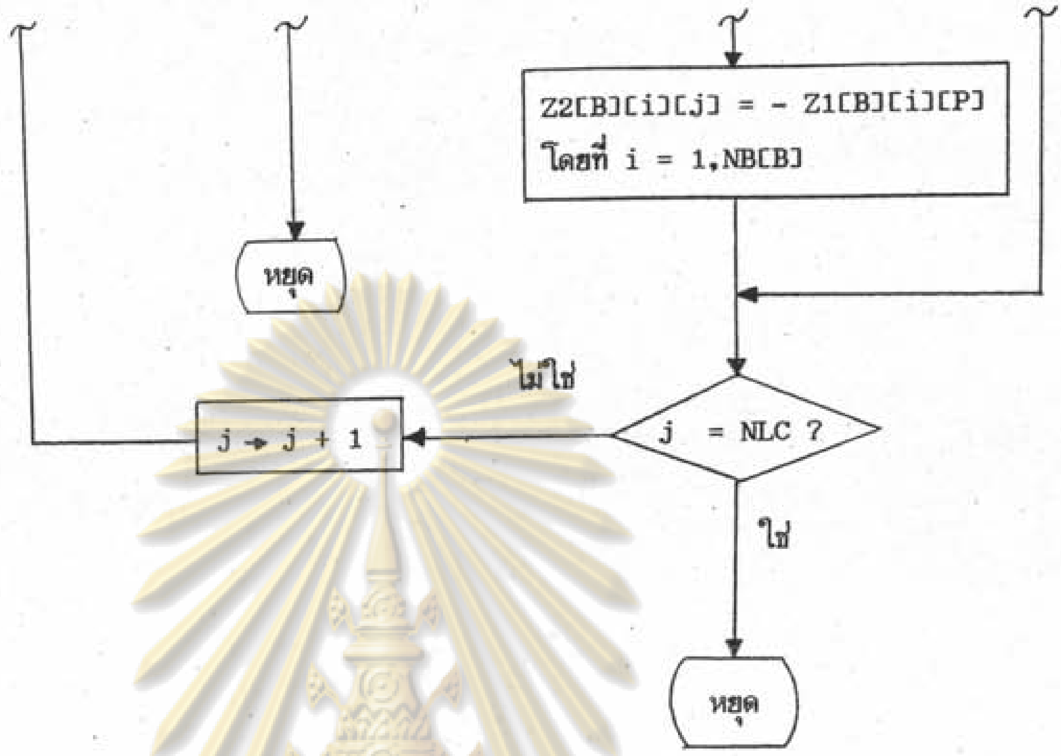



รูปที่ 5.5 โฟล์ชาร์ตแสดงการสร้างบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ของ Positive Sequence (Z 1)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

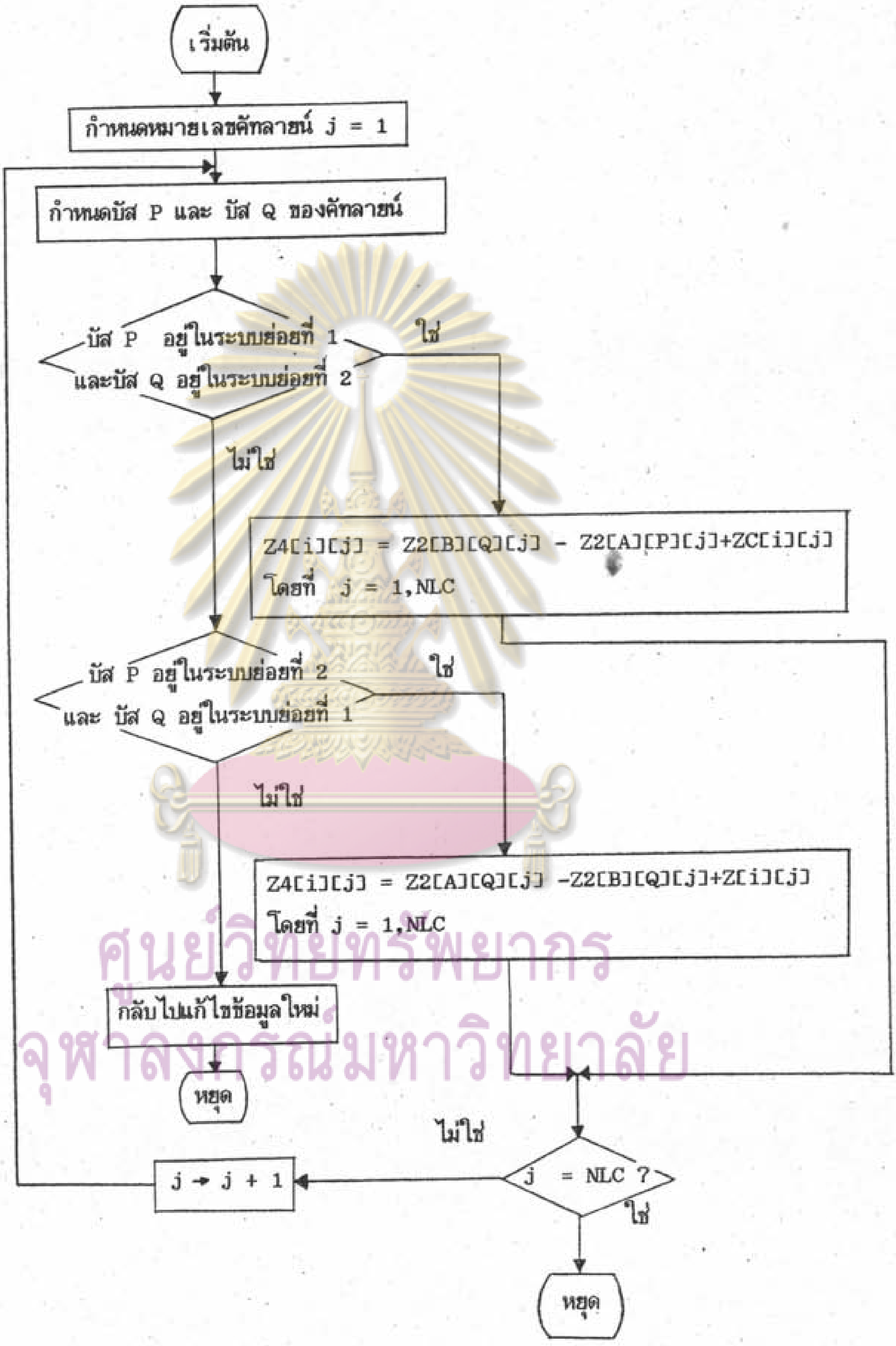



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



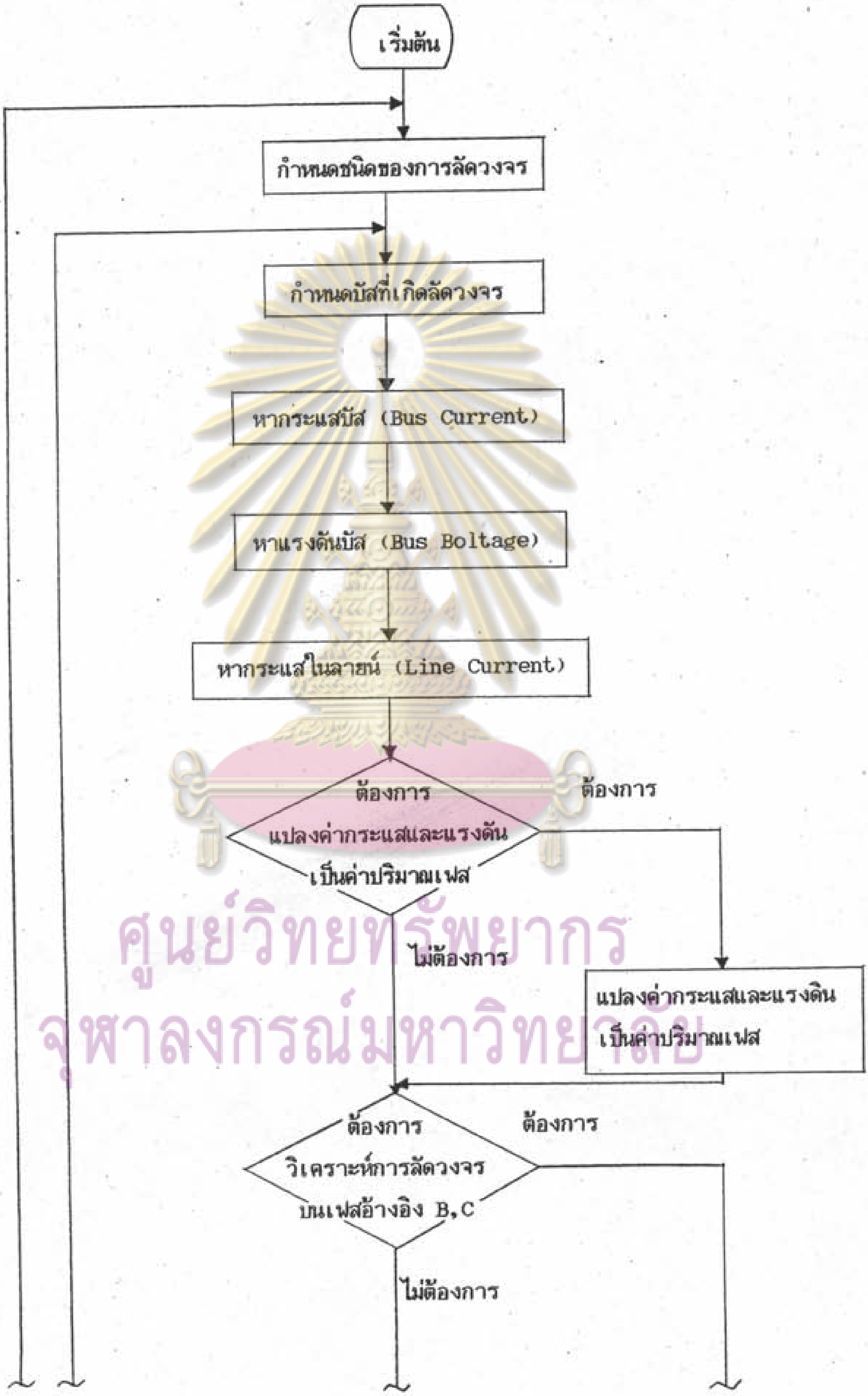

รูปที่ 5.6 โฟลว์ชาร์ตแสดงการสร้าง Z2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

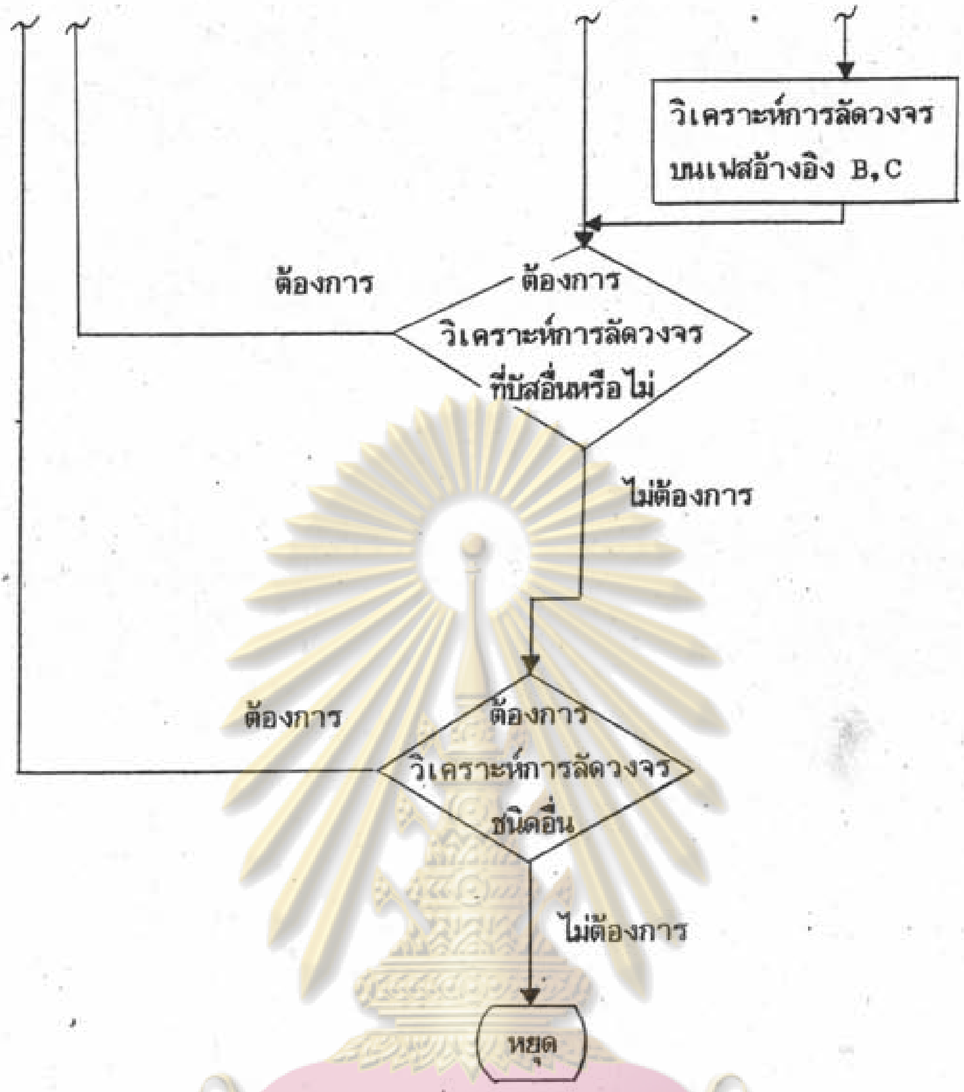



รูปที่ 5.7 โฟลว์ชาร์ตแสดงการสร้าง Z4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




รูปที่ 5.8 โฟลว์ชาร์ตแสดงการวิเคราะห์การลัดวงจรชนิดต่าง ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย