# บทที่ 2

# วิธีการวิจัย

## 2.1 ทฤษฎีและหลักการ

วิธีการสลายแบบสมบูรณ์คือวิธีการกระจายตัวแปรพื้นฐาน เพื่อให้สามารถนำไปอธิบายผลกระทบจากปัจจัยต่างๆได้ การศึกษานี้ วิธีการสลายแบบสมบูรณ์ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างแบบจำลองการประหยัดพลังงาน เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการชี้วัดการประเมินการประหยัดพลังงานในภาคอุตสาหกรรมของไทย โดยแบบจำลองเริ่มจากความสัมพันธ์ระหว่างผลิตภัณฑ์มวลรวม และการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์มวลรวม ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.1.1 แบบจำลองการประหยัดพลังงานแบบ 3 ตัวแปร

แบบจำลองการประหยัดพลังงานแบบ 3 ตัวแปรจะเริ่มจากสมการพื้นฐานดังนี้

$$I = \frac{E}{GDP} \tag{2.1}$$

ถ้าการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์มวลรวม $(I)$ ถูกคำนวณสำหรับในสาขาอุตสาหกรรมใดๆ ซึ่งก็จะใช้ผลิตภัณฑ์มวลรวมในสาขาอุตสาหกรรมนั้นๆ $(Q_i)$ ดังนั้นสมการที่ (2.1) ก็จะสามารถเขียนได้เป็น

$$I_i = \frac{E_i}{Q_i} \tag{2.2}$$

ดังนั้น การใช้พลังงานที่มีความสัมพันธ์กับผลิตภัณฑ์มวลรวมสามารถกระจายการเขียนได้เป็น

$$E = \frac{E}{Q}\frac{Q}{GDP}GDP \tag{2.3}$$

และการใช้พลังงานสำหรับหลายสาขาอุตสาหกรรมสามารถหาได้จากสมการที่ (2.4)

$$E = \sum_{i}^{n}\frac{E_i}{Q_i}\frac{Q_i}{GDP}GDP \tag{2.4}$$

จากนิยามของความเข้มข้นการใช้พลังงาน *(I)* และผลิตภัณฑ์มวลรวมจำเพาะในแต่ละสาขาอุตสาหกรรม *(Si)* ดังนั้นสมการที่ (2.4) จึงสามารถเขียนได้เป็น

$$E = \sum_{i}^{n} I_i S_i GDP \tag{2.5}$$

การเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงานในช่วงเวลาใดๆ *(t)* คือ

$$\Delta E = E^t - E^0 \tag{2.6}$$

$$= \sum_{i}^{n} I_i^t S_i^t GDP^t - \sum_{i}^{n} I_i{}^0 S_i^0 GDP^0 \tag{2.7}$$

หรือสามารถเขียนได้เป็น(Sun, 2001)

$$\Delta E = I_{effect} + S_{effect} + GDP_{effect} \tag{2.8}$$

โดยที่ $I_{effect}$, $S_{effect}$ และ $GDP_{effect}$ คือผลกระทบจากการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์มวลรวม ผลกระทบจากโครงสร้างเศรษฐกิจ และผลกระทบจากการเจริญเติบโตทาง

เศรษฐกิจ ตามลำดับ จากวิธีการสลายแบบสมบูรณ์ (Sun, 2001) ผลกระทบทั้งสามนี้สามารถกระจายการเขียนได้เป็น

$$I_{effect} = \sum_{i}^{n} \Delta I_i S_i^0 GDP^0 + \frac{1}{2}\sum_{i}^{n} \Delta I_i (\Delta S_i GDP^0 + S_i^0 \Delta GDP) + \frac{1}{3}\sum_{i}^{n} \Delta I_i \Delta S_i \Delta GDP \quad (2.9)$$

$$S_{effect} = \sum_{i}^{n} I_i^0 \Delta S_i GDP^0 + \frac{1}{2}\sum_{i}^{n} \Delta S_i (\Delta I_i GDP^0 + I_i^0 \Delta GDP) + \frac{1}{3}\sum_{i}^{n} \Delta I_i \Delta S_i \Delta GDP \quad (2.10)$$

$$GDP_{effect} = \sum_{i}^{n} I_i^0 S_i^0 \Delta GDP + \frac{1}{2}\sum_{i}^{n} \Delta GDP (\Delta I_i S_i^0 + I_i^0 \Delta S_i) + \frac{1}{3}\sum_{i}^{n} \Delta I_i \Delta S_i \Delta GDP \quad (2.11)$$

ภาคอุตสาหกรรมของไทยแบ่งสาขาอุตสาหกรรมออกเป็น 3 สาขาย่อยคือ สาขาเหมืองแร่ สาขาการก่อสร้าง และสาขาอุตสาหกรรมการผลิต ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงานทั้งหมดในภาคอุตสาหกรรม ก็คือการรวมการใช้พลังงานจากทั้ง 3 สาขาอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.8) ถึงสมการที่ (2.11)

จากสมการที่ (2.6) การใช้พลังงานจริง *(Real)* ในเวลาปีใดๆ ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$Real = E^t = \Delta E + E^0 \quad (2.12)$$

โดยที่แนวโน้มการใช้พลังงาน (*Trend*) ในปีใดๆ จะหาได้จากผลกระทบจากการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจบวกกับการใช้พลังงานในปีฐาน ซึ่งสามารถเขียนได้ดังในสมการที่ (2.13)

$$Trend = GDP_{effect} + E^0 \quad (2.13)$$

การประหยัดพลังงานสามารถให้นิยามได้ว่า คือความแตกต่างระหว่างการใช้พลังงานจริงและแนวโน้มการใช้พลังงาน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\psi = Real - Trend$$

$$= \Delta E - GDP_{effect} \qquad (2.14)$$

การประหยัดพลังงานจะเกิดขึ้นเมื่อ $\psi\langle 0$ ซึ่งจะบ่งบอกถึงว่า การใช้พลังงานจริงน้อยกว่าที่ควรจะเป็น (น้อยกว่าแนวโน้มการใช้พลังงาน *Trend* หรือ predicted) หรือกล่าวได้ว่า การเพิ่มขึ้นจริงของการใช้พลังงานน้อยกว่าที่ควรจะเป็นจากผลของการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ ซึ่งสภาวะดังกล่าวจะบ่งบอกถึงการประหยัดพลังงาน และความสำเร็จของแผนอนุรักษ์พลังงาน ในทางตรงกันข้ามถ้า $\psi\rangle 0$ จะบ่งบอกถึงการไม่ประหยัดพลังงาน ดังนั้น แบบจำลองการประหยัดพลังงานที่อยู่บนพื้นฐานของการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจสามารถเขียนได้เป็นดังต่อไปนี้

แทนสมการที่ (2.8) ลงในสมการที่ (2.14) จะได้เป็น

$$\psi = (I_{effect} + S_{effect} + GDP_{effect}) - GDP_{effect}$$

$$\psi = I_{effect} + S_{effect} \qquad (2.15)$$

แทนสมการที่ (2.9) และ (2.10) ลงในสมการที่ (2.15) จะได้เป็น

$$\psi = \left( \sum_i^n \Delta I_i S_i^0 GDP^0 + \frac{1}{2}\sum_i^n \Delta I_i (\Delta S_i GDP^0 + S_i^0 \Delta GDP) + \frac{1}{3}\sum_i^n \Delta I_i \Delta S_i \Delta GDP \right)$$
$$+ \left( \sum_i^n I_i^0 \Delta S_i GDP^0 + \frac{1}{2}\sum_i^n \Delta S_i (\Delta I_i GDP^0 + I_i^0 \Delta GDP) + \frac{1}{3}\sum_i^n \Delta I_i \Delta S_i \Delta GDP \right)$$

$$= \sum_i^n \Delta I_i S_i^0 GDP^0 + \frac{1}{2}\sum_i^n \Delta I_i (\Delta S_i GDP^0 + S_i^0 \Delta GDP) + \sum_i^n I_i^0 \Delta S_i GDP^0 +$$
$$\frac{1}{2}\sum_i^n \Delta S_i (\Delta I_i GDP^0 + I_i^0 \Delta GDP) + \frac{2}{3}\sum_i^n \Delta I_i \Delta S_i \Delta GDP \qquad (2.16)$$

### 2.1.2 แบบจำลองการประหยัดพลังงานแบบ 2 ตัวแปร

แบบจำลองการประหยัดพลังงานแบบ 2 ตัวแปรจะไม่คำนึงถึงอิทธิพลของโครงสร้างเศรษฐกิจ ดังนั้น สมการ (2.7) จะลดรูปเหลือเพียง

$$\Delta E = \sum_i^n I_i^t GDP^t - \sum_i^n I_i^0 GDP^0 \tag{2.17}$$

หรือสามารถเขียนได้เป็น (Sun, 2003)

$$\Delta E = I_{effect} + GDP_{effect} \tag{2.18}$$

โดยที่ $I_{effect}$ และ $GDP_{effect}$ คือผลกระทบจากผลกระทบจากการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์มวลรวม และผลกระทบจากการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ จากวิธีการสลายแบบสมบูรณ์ (Sun, 2003) ผลกระทบทั้งสองนี้ สามารถกระจายการเขียนได้เป็น

$$I_{effect} = \sum_i^n \Delta I_i GDP^0 + \frac{1}{2}\sum_i^n \Delta I_i \Delta GDP \tag{2.19}$$

$$GDP_{effect} = \sum_i^n I_i^0 \Delta GDP + \frac{1}{2}\sum_i^n \Delta I_i \Delta GDP \tag{2.20}$$

การประหยัดพลังงานจึงสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\psi = \Delta E - GDP_{effect} \tag{2.21}$$

$$\psi = I_{effect} \tag{2.22}$$

$$= \sum_i^n \Delta I_i GDP^0 + \frac{1}{2}\sum_i^n \Delta I_i \Delta GDP \tag{2.23}$$

เพื่อให้ได้ค่าการประหยัดพลังงานที่เป็นบวก เพราะฉะนั้นในงานวิจัยนี้ สมการที่ (2.15) และสมการที่ (2.22) จะถูกคูณด้วยเครื่องหมายลบ

### 2.1.3 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของการประหยัดพลังงานแบบ 3 ตัวแปร

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของการประหยัดพลังงานแบบ 3 ตัวแปร เริ่มจากสมการที่ (2.15) และ (2.16)

$$\psi = I_{effect} + S_{effect}$$

$$= \sum_{1}^{n} \Delta I_i S_i^0 GDP^0 + \frac{1}{2}\sum_{i}^{n} \Delta I_i (\Delta S_i GDP^0 + S_i^0 \Delta GDP) + \sum_{i}^{n} I^0 \Delta S_i GDP^0$$
$$+ \frac{1}{2}\sum_{i}^{n} \Delta S_i (\Delta I_i GDP^0 + I_i^0 \Delta GDP) + \frac{2}{3}\sum_{i}^{n} \Delta I_i \Delta S_i \Delta GDP$$

การประหยัดพลังงานในภาคอุตสาหกรรม ($\psi$) คือการรวมผลของการประหยัดพลังงานในแต่ละสาขาอุตสาหกรรมคือ สาขาเหมืองแร่ ($\psi_1$) สาขาการก่อสร้าง ($\psi_2$) และสาขาอุตสาหกรรมการผลิต ($\psi_3$) ดังนั้นการประหยัดพลังงานในภาคอุตสาหกรรมสามารถเขียนได้เป็น

$$\psi = \sum_{i}^{n} \psi_i \tag{2.24}$$

$$= \psi_1 + \psi_2 + \psi_3 \tag{2.25}$$

จากสมการที่ (2.25) การเปลี่ยนแปลงการประหยัดพลังงานในภาคอุตสาหกรรมสามารถหาได้จากสูตร $d(A+B) = dA + dB$

$$d\psi = d\psi_1 + d\psi_2 + d\psi_3 \tag{2.26}$$

จะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงการประหยัดพลังงานในภาคอุตสาหกรรมก็คือผลรวมของการเปลี่ยนแปลงการประหยัดพลังงาน ในแต่ละสาขาอุตสาหกรรมนั่นเอง ดังนั้นจากสมการที่ (2.16) การประหยัดพลังงานในแต่ละสาขาอุตสาหกรรมจะมีรูปแบบสูตรเหมือนกันดังนี้

$$\psi_i = \Delta I S^0 GDP^0 + \frac{1}{2}\Delta I \Delta S GDP^0 + \frac{1}{2}\Delta I S^0 \Delta GDP + I^0 \Delta S GDP^0 + \frac{1}{2}\Delta S \Delta I GDP^0 + \frac{1}{2}\Delta S I^0 \Delta GDP + \frac{2}{3}\Delta I \Delta S \Delta GDP$$

$$= (I^t - I^0)S^0 GDP^0 + \frac{1}{2}(I^t - I^0)\Delta S GDP^0 + \frac{1}{2}(I^t - I^0)S^0 \Delta GDP + I^0 \Delta S GDP^0 + \frac{1}{2}(I^t - I^0)\Delta S GDP^0 + \frac{1}{2}\Delta S I^0 \Delta GDP + \frac{2}{3}(I^t - I^0)\Delta S \Delta GDP$$

$$= I^t S^0 GDP^0 - I^0 S^0 GDP^0 + \frac{1}{2} I^t \Delta S GDP^0 - \frac{1}{2} I^0 \Delta S GDP^0 + \frac{1}{2} I^t S^0 \Delta GDP - \frac{1}{2} I^0 S^0 \Delta GDP + I^0 \Delta S GDP^0 + \frac{1}{2} I^t \Delta S GDP^0 - \frac{1}{2} I^0 \Delta S GDP^0 + \frac{1}{2}\Delta S I^0 \Delta GDP + \frac{2}{3} I^t \Delta S \Delta GDP - \frac{2}{3} I^0 \Delta S \Delta GDP$$

$$= I^t S^0 GDP^0 - I^0 S^0 GDP^0 + \frac{1}{2}(S^t - S^0) I^t GDP^0 - \frac{1}{2}(S^t - S^0) I^0 GDP^0 \frac{1}{2} I^t S^0 \Delta GDP - \frac{1}{2} I^0 S^0 \Delta GDP + (S^t - S^0) I^0 GDP^0 + \frac{1}{2}(S^t - S^0) I^t GDP^0 - \frac{1}{2}(S^t - S^0) I^0 GDP^0 + \frac{1}{2}(S^t - S^0) I^0 \Delta GDP + \frac{2}{3}(S^t - S^0) I^t \Delta GDP - \frac{2}{3}(S^t - S^0) I^0 \Delta GDP$$

$$= I^t S^0 GDP^0 - I^0 S^0 GDP^0 + \frac{1}{2} S^t I^t GDP^0 - \frac{1}{2} S^0 I^t GDP^0 - \frac{1}{2} S^t I^0 GDP^0$$
$$+ \frac{1}{2} S^0 I^0 GDP^0 + \frac{1}{2} (GDP^t - GDP^0) I^t S^0 - \frac{1}{2} (GDP^t - GDP^0) I^0 S^0$$
$$+ S^t I^0 GDP^0 - S^0 I^0 GDP^0 + \frac{1}{2} S^t I^t GDP^0 - \frac{1}{2} S^0 I^t GDP^0 - \frac{1}{2} S^t I^0 GDP^0$$
$$+ \frac{1}{2} S^0 I^0 GDP^0 + \frac{1}{2} S^t I^0 \Delta GDP - \frac{1}{2} S^0 I^0 \Delta GDP + \frac{2}{3} S^t I^t \Delta GDP - \frac{2}{3} S^0 I^t \Delta GDP$$
$$- \frac{2}{3} S^t I^0 \Delta GDP + \frac{2}{3} S^0 I^0 \Delta GDP$$

$$= I^t S^0 GDP^0 - I^0 S^0 GDP^0 + \frac{1}{2} S^t I^t GDP^0 - \frac{1}{2} S^0 I^t GDP^0 - \frac{1}{2} S^t I^0 GDP^0$$
$$+ \frac{1}{2} S^0 I^0 GDP^0 + \frac{1}{2} GDP^t I^t S^0 - \frac{1}{2} GDP^0 I^t S^0 - \frac{1}{2} GDP^t I^0 S^0 + \frac{1}{2} GDP^0 I^0 S^0$$
$$+ S^t I^0 GDP^0 - S^0 I^0 GDP^0 + \frac{1}{2} S^t I^t GDP^0 - \frac{1}{2} S^0 I^t GDP^0 - \frac{1}{2} S^t I^0 GDP^0$$
$$+ \frac{1}{2} S^0 I^0 GDP^0 + \frac{1}{2} S^t I^0 (GDP^t - GDP^0) - \frac{1}{2} S^0 I^0 (GDP^t - GDP^0)$$
$$+ \frac{2}{3} S^t I^t (GDP^t - GDP^0) - \frac{2}{3} S^0 I^t (GDP^t - GDP^0) - \frac{2}{3} S^t I^0 (GDP^t - GDP^0)$$
$$+ \frac{2}{3} S^0 I^0 (GDP^t - GDP^0)$$

$$= I^t S^0 GDP^0 - I^0 S^0 GDP^0 + \frac{1}{2} S^t I^t GDP^0 - \frac{1}{2} S^0 I^t GDP^0 - \frac{1}{2} S^t I^0 GDP^0$$
$$+ \frac{1}{2} S^0 I^0 GDP^0 + \frac{1}{2} GDP^t I^t S^0 - \frac{1}{2} GDP^0 I^t S^0 - \frac{1}{2} GDP^t I^0 S^0 + \frac{1}{2} GDP^0 I^0 S^0$$
$$+ S^t I^0 GDP^0 - S^0 I^0 GDP^0 + \frac{1}{2} S^t I^t GDP^0 - \frac{1}{2} S^0 I^t GDP^0 - \frac{1}{2} S^t I^0 GDP^0$$
$$+ \frac{1}{2} S^0 I^0 GDP^0 + \frac{1}{2} S^t I^0 GDP^t - \frac{1}{2} S^t I^0 GDP^0 - \frac{1}{2} S^0 I^0 GDP^t + \frac{1}{2} S^0 I^0 GDP^0$$
$$+ \frac{2}{3} S^t I^t GDP^t - \frac{2}{3} S^t I^t GDP^0 - \frac{2}{3} S^0 I^t GDP^t + \frac{2}{3} S^0 I^t GDP^0 - \frac{2}{3} S^t I^0 GDP^t$$
$$+ \frac{2}{3} S^t I^0 GDP^0 + \frac{2}{3} S^0 I^0 GDP^t - \frac{2}{3} S^0 I^0 GDP^0$$

$$=\frac{1}{2}S^tI^tGSP^0+\frac{1}{2}GDP^tI^tS^0-\frac{1}{2}GDP^tI^0S^0+\frac{1}{2}S^tI^tGDP^0-\frac{1}{2}S^0I^tGDP^0$$
$$+\frac{1}{2}S^tI^0GDP^t-\frac{1}{2}S^tI^0GDP^0-\frac{1}{2}S^0I^0GDP^t+\frac{2}{3}S^tI^tGDP^t-\frac{2}{3}S^tI^tGDP^0$$
$$-\frac{2}{3}S^0I^tGDP^t+\frac{2}{3}S^0I^tGDP^0-\frac{2}{3}S^tI^0GDP^t+\frac{2}{3}S^tI^0GDP^0+\frac{2}{3}S^0I^0GDP^t$$
$$-\frac{2}{3}S^0I^0GDP^0$$

$$=\frac{1}{3}S^tI^tGDP^0-\frac{1}{6}GDP^tI^tS^0-\frac{1}{3}GDP^tI^0S^0+\frac{1}{6}S^0I^tGDP^0-\frac{1}{6}S^tI^0GDP^t$$
$$+\frac{1}{6}S^tI^0GDP^0+\frac{2}{3}S^tI^tGDP^t-\frac{2}{3}S^0I^0GDP^0$$
$$=\frac{1}{3}\frac{E^tS^tGDP^0}{Q^t}-\frac{1}{6}\frac{E^tS^0GDP^t}{Q^t}-\frac{1}{3}\frac{E^0S^0GDP^t}{Q^0}+\frac{1}{6}\frac{E^tS^0GDP^0}{Q^t}$$
$$-\frac{1}{6}\frac{E^0S^tGDP^t}{Q^0}+\frac{1}{6}\frac{E^0S^tGDP^0}{Q^0}+\frac{2}{3}\frac{E^tS^tGDP^t}{Q^t}-\frac{2}{3}\frac{E^0S^0GDP^0}{Q^0}$$

$$=\frac{1}{3}\frac{E^tQ^tGDP^0}{Q^tGDP^t}-\frac{1}{6}\frac{E^tQ^0GDP^t}{Q^tGDP^0}-\frac{1}{3}\frac{E^0Q^0GDP^t}{Q^0GDP^0}+\frac{1}{6}\frac{E^tQ^0GDP^0}{Q^tGDP^0}$$
$$-\frac{1}{6}\frac{E^0Q^tGDP^t}{Q^0GDP^t}+\frac{1}{6}\frac{E^0Q^tGDP^0}{Q^0GDP^t}+\frac{2}{3}\frac{E^tQ^tGDP^t}{Q^tGDP^t}-\frac{2}{3}\frac{E^0Q^0GDP^0}{Q^0GDP^0}$$

$$=\frac{1}{3}\frac{E^tGDP^0}{GDP^t}-\frac{1}{6}\frac{E^tQ^0GDP^t}{Q^tGDP^0}-\frac{1}{3}\frac{E^0GDP^t}{GDP^0}+\frac{1}{6}\frac{E^tQ^0}{Q^t}-\frac{1}{6}\frac{E^0Q^t}{Q^0}$$
$$+\frac{1}{6}\frac{E^0Q^tGDP^0}{Q^0GDP^t}+\frac{2}{3}E^t-\frac{2}{3}E^0 \qquad (2.27)$$

จากสมการที่ (2.27) ดังนั้นการประหยัดพลังงานในสาขาเหมืองแร่ สาขาการก่อสร้าง และสาขาอุตสาหกรรมการผลิต สามารถเขียนได้เป็น

$$\psi_1=\frac{1}{3}\frac{E_1^tGDP^0}{GDP^t}-\frac{1}{6}\frac{E_1^tQ_1^0GDP^t}{Q_1^tGDP^0}-\frac{1}{3}\frac{E_1^0GDP^t}{GDP^0}+\frac{1}{6}\frac{E_1^tQ_1^0}{Q_1^t}-\frac{1}{6}\frac{E_1^0Q_1^t}{Q_1^0}$$
$$+\frac{1}{6}\frac{E_1^0Q_1^tGDP^0}{Q_1^0GDP^t}+\frac{2}{3}E_1^t-\frac{2}{3}E_1^0 \qquad (2.28)$$

$$\psi_2 = \frac{1}{3}\frac{E_2^t GDP^0}{GDP^t} - \frac{1}{6}\frac{E_2^t Q_2^0 GDP^t}{Q_2^t GDP^0} - \frac{1}{3}\frac{E_2^0 GDP^t}{GDP^0} + \frac{1}{6}\frac{E_2^t Q_2^0}{Q_2^t} - \frac{1}{6}\frac{E_2^0 Q_2^t}{Q_2^0} + \frac{1}{6}\frac{E_2^0 Q_2^t GDP^0}{Q_2^0 GDP^t} + \frac{2}{3}E_2^t - \frac{2}{3}E_2^0 \quad (2.29)$$

$$\psi_3 = \frac{1}{3}\frac{E_3^t GDP^0}{GDP^t} - \frac{1}{6}\frac{E_3^t Q_3^0 GDP^t}{Q_3^t GDP^0} - \frac{1}{3}\frac{E_3^0 GDP^t}{GDP^0} + \frac{1}{6}\frac{E_3^t Q_3^0}{Q_3^t} - \frac{1}{6}\frac{E_3^0 Q_3^t}{Q_3^0} + \frac{1}{6}\frac{E_3^0 Q_3^t GDP^0}{Q_3^0 GDP^t} + \frac{2}{3}E_3^t - \frac{2}{3}E_3^0 \quad (2.30)$$

เนื่องจากผลิตภัณฑ์มวลรวมในภาคอุตสาหกรรมในเวลาใดๆ ($t$) คือ ผลรวมของผลิตภัณฑ์มวลรวมของแต่ละสาขาอุตสาหกรรมในเวลาใดๆ ($t$) คือ สาขาเหมืองแร่ ($Q_1$) สาขาการก่อสร้าง ($Q_2$) และสาขาอุตสาหกรรมการผลิต ($Q_3$) ดังนั้นจึงสามารถเขียนได้เป็น

$$GDP^t = Q_1^t + Q_2^t + Q_3^t \quad (2.31)$$

แทนสมการที่ (2.31) ลงในสมการที่ (2.28) (2.29) และ (2.30) จะได้เป็น

$$\psi_1 = \frac{1}{3}\frac{E_1^t GDP^0}{(Q_1^t + Q_2^t + Q_3^t)} - \frac{1}{6}\frac{E_1^t Q_1^0 (Q_1^t + Q_2^t + Q_3^t)}{Q_1^t GDP^0} - \frac{1}{3}\frac{E_1^0 (Q_1^t + Q_2^t + Q_3^t)}{GDP^0} + \frac{1}{6}\frac{E_1^t Q_1^0}{Q_1^t} - \frac{1}{6}\frac{E_1^0 Q_1^t}{Q_1^0} + \frac{1}{6}\frac{E_1^0 Q_1^t GDP^0}{Q_1^0 (Q_1^t + Q_2^t + Q_3^t)} + \frac{2}{3}E_1^t - \frac{2}{3}E_1^0 \quad (2.32)$$

$$\psi_2 = \frac{1}{3}\frac{E_2^t GDP^0}{(Q_1^t + Q_2^t + Q_3^t)} - \frac{1}{6}\frac{E_2^t Q_2^0 (Q_1^t + Q_2^t + Q_3^t)}{Q_2^t GDP^0} - \frac{1}{3}\frac{E_2^0 (Q_1^t + Q_2^t + Q_3^t)}{GDP^0} + \frac{1}{6}\frac{E_2^t Q_2^0}{Q_2^t} - \frac{1}{6}\frac{E_2^0 Q_2^t}{Q_2^0} + \frac{1}{6}\frac{E_2^0 Q_2^t GDP^0}{Q_2^0 (Q_1^t + Q_2^t + Q_3^t)} + \frac{2}{3}E_2^t - \frac{2}{3}E_2^0 \quad (2.33)$$

$$\psi_3 = \frac{1}{3}\frac{E_3^t GDP^0}{(Q_1^t + Q_2^t + Q_3^t)} - \frac{1}{6}\frac{E_3^t Q_3^0 (Q_1^t + Q_2^t + Q_3^t)}{Q_3^t GDP^0} - \frac{1}{3}\frac{E_3^0 (Q_1^t + Q_2^t + Q_3^t)}{GDP^0} + \frac{1}{6}\frac{E_3^t Q_3^0}{Q_3^t} - \frac{1}{6}\frac{E_3^0 Q_3^t}{Q_3^0} + \frac{1}{6}\frac{E_3^0 Q_3^t GDP^0}{Q_3^0 (Q_1^t + Q_2^t + Q_3^t)} + \frac{2}{3}E_3^t - \frac{2}{3}E_3^0 \quad (2.34)$$

$$\psi_1 = f(E_1^t, Q_1^t, Q_2^t, Q_3^t) \quad (2.35)$$

$$\psi_2 = f(E_2^t, Q_1^t, Q_2^t, Q_3^t) \quad (2.36)$$

$$\psi_3 = f(E_3^t, Q_1^t, Q_2^t, Q_3^t) \quad (2.37)$$

ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงการประหยัดพลังงานในแต่ละสาขาอุตสาหกรรมสามารถเขียนได้เป็น

$$d\psi_1 = \frac{\partial \psi_1}{\partial E_1^t} dE_1^t + \frac{\partial \psi_1}{\partial Q_1^t} dQ_1^t + \frac{\partial \psi_1}{\partial Q_2^t} dQ_2^t + \frac{\partial \psi_1}{\partial Q_3^t} dQ_3^t \quad (2.38)$$

$$d\psi_2 = \frac{\partial \psi_2}{\partial E_2^t} dE_2^t + \frac{\partial \psi_2}{\partial Q_1^t} dQ_1^t + \frac{\partial \psi_2}{\partial Q_2^t} dQ_2^t + \frac{\partial \psi_2}{\partial Q_3^t} dQ_3^t \quad (2.39)$$

$$d\psi_3 = \frac{\partial \psi_3}{\partial E_3^t} dE_3^t + \frac{\partial \psi_3}{\partial Q_1^t} dQ_1^t + \frac{\partial \psi_3}{\partial Q_2^t} dQ_2^t + \frac{\partial \psi_3}{\partial Q_3^t} dQ_3^t \quad (2.40)$$

จากสมการที่ (2.32) และ (2.38) สามารถหาการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดในสาขาเหมืองแร่ได้ดังนี้

$$\frac{\partial \psi_1}{\partial E_1^t} = \frac{1}{3}\frac{GDP^0}{(Q_1^t + Q_2^t + Q_3^t)} - \frac{1}{6}\frac{Q_1^0 (Q_1^t + Q_2^t + Q_3^t)}{Q_1^t GDP^0} + \frac{1}{6}\frac{Q_1^0}{Q_1^t} + \frac{2}{3} \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial \psi_1}{\partial Q_1^t} = -\frac{1}{3}\frac{E_1^t GDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2} - \frac{1}{6}\frac{E_1^t Q_1^0}{GDP^0}\left(\frac{Q_1^t-(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)}{(Q_1^t)^2}\right) - \frac{1}{3}\frac{E_1^0}{GDP^0}$$
$$-\frac{1}{6}\frac{E_1^t Q_1^0}{(Q_1^t)^2} - \frac{1}{6}\frac{E_1^0}{Q_1^0} + \frac{1}{6}\frac{E_1^0 GDP^0}{Q_1^0}\left(\frac{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)-Q_1^t}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}\right)$$

$$= -\frac{1}{3}\frac{E_1^t GDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2} + \frac{1}{6}\frac{E_1^t Q_1^0}{GDP^0}\left(\frac{Q_2^t+Q_3^t}{(Q_1^t)^2}\right) - \frac{1}{3}\frac{E_1^0}{GDP^0}$$
$$-\frac{1}{6}\frac{E_1^t Q_1^0}{(Q_1^t)^2} - \frac{1}{6}\frac{E_1^0}{Q_1^0} + \frac{1}{6}\frac{E_1^0 GDP^0}{Q_1^0}\left(\frac{Q_2^t+Q_3^t}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}\right) \quad (2.42)$$

$$\frac{\partial \psi_1}{\partial Q_2^t} = -\frac{1}{3}\frac{E_1^t GDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2} - \frac{1}{6}\frac{E_1^t Q_1^0}{Q_1^t GDP^0} - \frac{1}{3}\frac{E_1^0}{GDP^0} -$$
$$\frac{1}{6}\frac{E_1^0 Q_1^t GDP^0}{Q_1^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2} \quad (2.43)$$

$$\frac{\partial \psi_1}{\partial Q_3^t} = -\frac{1}{3}\frac{E_1^t GDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2} - \frac{1}{6}\frac{E_1^t Q_1^0}{Q_1^t GDP^0} - \frac{1}{3}\frac{E_1^0}{GDP^0}$$
$$-\frac{1}{6}\frac{E_1^0 Q_1^t GDP^0}{Q_1^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2} \quad (2.44)$$

แทนสมการที่ (2.41) ถึงสมการที่ (2.44) ลงในสมการ (2.38) ฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงการประหยัดพลังงานทั้งหมดในสาขาเหมืองแร่สามารถเขียนได้เป็น

$$d\psi_1 = \left(\frac{1}{3}\frac{GDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)} - \frac{1}{6}\frac{Q_1^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)}{Q_1^t GDP^0} + \frac{1}{6}\frac{Q_1^0}{Q_1^t} + \frac{2}{3}\right)dE_1^t +$$
$$\left(-\frac{1}{3}\frac{E_1^t GDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2} + \frac{1}{6}\frac{E_1^t Q_1^0}{GDP^0}\left(\frac{Q_2^t+Q_3^t}{(Q_1^t)^2}\right) - \frac{1}{3}\frac{E_1^0}{GDP^0} - \frac{1}{6}\frac{E_1^t Q_1^0}{(Q_1^t)^2}\right.$$
$$\left. -\frac{1}{6}\frac{E_1^0}{Q_1^0} + \frac{1}{6}\frac{E_1^0 GDP^0}{Q_1^0}\left(\frac{Q_2^t+Q_3^t}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}\right)\right)dQ_1^t +$$
$$\left(-\frac{1}{3}\frac{E_1^t GDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2} - \frac{1}{6}\frac{E_1^t Q_1^0}{Q_1^t GDP^0} - \frac{1}{3}\frac{E_1^0}{GDP^0} - \frac{1}{6}\frac{E_1^0 Q_1^t GDP^0}{Q_1^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}\right)dQ_2^t +$$
$$\left(-\frac{1}{3}\frac{E_1^t GDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2} - \frac{1}{6}\frac{E_1^t Q_1^0}{Q_1^t GDP^0} - \frac{1}{3}\frac{E_1^0}{GDP^0} - \frac{1}{6}\frac{E_1^0 Q_1^t GDP^0}{Q_1^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}\right)dQ_3^t \quad (2.45)$$

ในทำนองเดียวกัน การประหยัดพลังงานในสาขาการก่อสร้างและสาขาอุตสาหกรรมการผลิต สามารถเขียนได้เป็น สมการ (2.46) และ (2.47) ตามลำดับ

$$
\begin{aligned}
d\psi_2 = &\left(\frac{1}{3}\frac{GDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)} - \frac{1}{6}\frac{Q_2^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)}{Q_2^t GDP^0} + \frac{1}{6}\frac{Q_2^0}{Q_2^t} + \frac{2}{3}\right)dE_2^t + \\
&\left(-\frac{1}{3}\frac{E_2^t GDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2} - \frac{1}{6}\frac{E_2^t Q_2^0}{Q_2^t GDP^0} - \frac{1}{3}\frac{E_2^0}{GDP^0} - \frac{1}{6}\frac{E_2^0 Q_2^t GDP^0}{Q_2^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}\right)dQ_1^t + \\
&\left(\begin{aligned}
&-\frac{1}{3}\frac{E_2^t GDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2} + \frac{1}{6}\frac{E_2^t Q_2^0}{GDP^0}\left(\frac{Q_1^t+Q_3^t}{(Q_2^t)^2}\right) - \frac{1}{3}\frac{E_2^0}{GDP^0} - \frac{1}{6}\frac{E_2^t Q_2^0}{(Q_2^t)^2} \\
&-\frac{1}{6}\frac{E_2^0}{Q_2^0} + \frac{1}{6}\frac{E_2^0 GDP^0}{Q_2^0}\left(\frac{Q_1^t+Q_3^t}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}\right)
\end{aligned}\right)dQ_2^t + \\
&\left(-\frac{1}{3}\frac{E_2^t GDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2} - \frac{1}{6}\frac{E_2^t Q_2^0}{Q_2^t GDP^0} - \frac{1}{3}\frac{E_2^0}{GDP^0} - \frac{1}{6}\frac{E_2^0 Q_2^t GDP^0}{Q_2^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}\right)dQ_3^t
\end{aligned}
\tag{2.46}
$$

$$
\begin{aligned}
d\psi_3 = &\left(\frac{1}{3}\frac{GDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)} - \frac{1}{6}\frac{Q_3^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)}{Q_3^t GDP^0} + \frac{1}{6}\frac{Q_3^0}{Q_3^t} + \frac{2}{3}\right)dE_3^t + \\
&\left(-\frac{1}{3}\frac{E_3^t GDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2} - \frac{1}{6}\frac{E_3^t Q_3^0}{Q_3^t GDP^0} - \frac{1}{3}\frac{E_3^0}{GDP^0} - \frac{1}{6}\frac{E_3^0 Q_3^t GDP^0}{Q_3^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}\right)dQ_1^t + \\
&\left(-\frac{1}{3}\frac{E_3^t GDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2} - \frac{1}{6}\frac{E_3^t Q_3^0}{Q_3^t GDP^0} - \frac{1}{3}\frac{E_3^0}{GDP^0} - \frac{1}{6}\frac{E_3^0 Q_3^t GDP^0}{Q_3^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}\right)dQ_2^t + \\
&\left(\begin{aligned}
&-\frac{1}{3}\frac{E_3^t GDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2} + \frac{1}{6}\frac{E_3^t Q_3^0}{GDP^0}\left(\frac{Q_1^t+Q_2^t}{(Q_3^t)^2}\right) - \frac{1}{3}\frac{E_3^0}{GDP^0} - \frac{1}{6}\frac{E_3^t Q_3^0}{(Q_3^t)^2} - \frac{1}{6}\frac{E_3^0}{Q_3^0} + \\
&\frac{1}{6}\frac{E_3^0 GDP^0}{Q_3^0}\left(\frac{Q_1^t+Q_2^t}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}\right)
\end{aligned}\right)dQ_3^t
\end{aligned}
\tag{2.47}
$$

แทนสมการที่ (2.45) ถึงสมการที่ (2.47) ลงในสมการที่ (2.26) ก็จะสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการประหยัดพลังงานทั้งหมดในภาคอุตสาหกรรมได้

**2.1.4 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของการประหยัดพลังงานแบบ 2 ตัวแปร**

จากสมการที่ (2.23) การประหยัดพลังงานในแต่ละสาขาอุตสาหกรรมจะมีสูตรการคำนวณที่เหมือนกัน เพราะฉะนั้นจึงสามารถกระจายสูตรการประหยัดพลังงานในสาขาอุตสาหกรรมใดๆ ($\psi_i$) ได้ดังต่อไปนี้

$$\psi_i = GDP^0 \Delta I + \frac{1}{2}\Delta I \Delta GDP$$

$$= GDP^0 (I^t - I^0) + \frac{1}{2}(I^t - I^0)(GDP^t - GDP^0)$$

$$= GDP^0 I^t - GDP^0 I^0 + \frac{1}{2}(I^t GDP^t - I^t GDP^0 - I^0 GDP^t + I^0 GDP^0)$$

$$= GDP^0 \frac{E^t}{GDP^t} - GDP^0 \frac{E^0}{GDP^0} + \frac{1}{2} GDP^t \frac{E^t}{GDP^t} - \frac{1}{2} GDP^0 \frac{E^t}{GDP^t}$$
$$- \frac{1}{2} GDP^t \frac{E^0}{GDP^0} + \frac{1}{2} GDP^0 \frac{E^0}{GDP^0}$$

$$= GDP^0 \frac{E^t}{GDP^t} - E^0 + \frac{1}{2}E^t - \frac{1}{2} GDP^0 \frac{E^t}{GDP^t} - \frac{1}{2} GDP^t \frac{E^0}{GDP^0} + \frac{1}{2}E^0$$

$$= \frac{1}{2} GDP^0 \frac{E^t}{GDP^t} - \frac{1}{2}E^0 + \frac{1}{2}E^t - \frac{1}{2} GDP^t \frac{E^0}{GDP^0}$$

$$\psi_i = \frac{1}{2}\frac{GDP^0 E^t}{GDP^t} - \frac{1}{2}E^0 + \frac{1}{2}E^t - \frac{1}{2}\frac{GDP^t E^0}{GDP^0} \qquad (2.48)$$

จากสมการที่ (2.48) การประหยัดพลังงานในสาขาเหมืองแร่ สาขาการก่อสร้าง และสาขาอุตสาหกรรมการผลิต สามารถเขียนได้เป็น

$$\psi_1 = \frac{1}{2}\frac{GDP^0 E_1^t}{GDP^t} - \frac{1}{2}E_1^0 + \frac{1}{2}E_1^t - \frac{1}{2}\frac{GDP^t E_1^0}{GDP^0} \qquad (2.49)$$

$$\psi_2 = \frac{1}{2}\frac{GDP^0 E_2^t}{GDP^t} - \frac{1}{2}E_2^0 + \frac{1}{2}E_2^t - \frac{1}{2}\frac{GDP^t E_2^0}{GDP^0} \tag{2.50}$$

$$\psi_3 = \frac{1}{2}\frac{GDP^0 E_3^t}{GDP^t} - \frac{1}{2}E_3^0 + \frac{1}{2}E_3^t - \frac{1}{2}\frac{GDP^t E_3^0}{GDP^0} \tag{2.51}$$

$$\psi_1 = f(E_1^t, GDP^t) \tag{2.52}$$

$$\psi_2 = f(E_2^t, GDP^t) \tag{2.53}$$

$$\psi_3 = f(E_3^t, GDP^t) \tag{2.54}$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดของการประหยัดพลังงาน ในแต่ละสาขาอุตสาหกรรมสามารถเขียนได้เป็น

$$d\psi_1 = \frac{\partial \psi_1}{\partial E_1^t} dE_1^t + \frac{\partial \psi_1}{\partial GDP^t} dGDP^t \tag{2.55}$$

$$d\psi_2 = \frac{\partial \psi_2}{\partial E_2^t} dE_2^t + \frac{\partial \psi_2}{\partial GDP^t} dGDP^t \tag{2.56}$$

$$d\psi_3 = \frac{\partial \psi_3}{\partial E_3^t} dE_3^t + \frac{\partial \psi_3}{\partial GDP^t} dGDP^t \tag{2.57}$$

จากสมการที่ (2.49) และ (2.55) สามารถหาการเปลี่ยนแปลงการประหยัดพลังงานทั้งหมดในสาขาเหมืองแร่ได้ดังนี้

$$\frac{\partial \psi_1}{\partial E_1^t} = \frac{1}{2}\frac{GDP^0}{GDP^t} + \frac{1}{2} \tag{2.58}$$

$$\frac{\partial \psi_1}{\partial GDP^t} = -\frac{1}{2}\frac{GDP^0 E_1^t}{(GDP^t)^2} - \frac{1}{2}\frac{E_1^0}{GDP^0} \tag{2.59}$$

แทนสมการที่ (2.58) และ (2.59) ลงในสมการ (2.55) ฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงการประหยัดพลังงานทั้งหมดในสาขาเหมืองแร่สามารถเขียนได้เป็น

$$d\psi_1 = \left(\frac{1}{2}\frac{GDP^0}{GDP^t} + \frac{1}{2}\right)dE_1^t + \left(-\frac{1}{2}\frac{GDP^0 E_1^t}{(GDP^t)^2} - \frac{1}{2}\frac{E_1^0}{GDP^0}\right)dGDP^t \tag{2.60}$$

เช่นเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงการประหยัดพลังงานทั้งหมดในสาขาการก่อสร้างและสาขาอุตสาหกรรมการผลิตสามารถหาได้จากสมการที่ (2.61) และ (2.62)

$$d\psi_2 = \left(\frac{1}{2}\frac{GDP^0}{GDP^t} + \frac{1}{2}\right)dE_2^t + \left(-\frac{1}{2}\frac{GDP^0 E_2^t}{(GDP^t)^2} - \frac{1}{2}\frac{E_2^0}{GDP^0}\right)dGDP^t \tag{2.61}$$

$$d\psi_3 = \left(\frac{1}{2}\frac{GDP^0}{GDP^t} + \frac{1}{2}\right)dE_3^t + \left(-\frac{1}{2}\frac{GDP^0 E_3^t}{(GDP^t)^2} - \frac{1}{2}\frac{E_3^0}{GDP^0}\right)dGDP^t \tag{2.62}$$

แทนสมการที่ (2.60) ถึงสมการที่ (2.62) ลงในสมการที่ (2.26) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงการประหยัดพลังงานทั้งหมดในภาคอุตสาหกรรมสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} d\psi = &\left(\frac{1}{2}\frac{GDP^0}{GDP^t} + \frac{1}{2}\right)dE_1^t + \left(-\frac{1}{2}\frac{GDP^0 E_1^t}{(GDP^t)^2} - \frac{1}{2}\frac{E_1^0}{GDP^0}\right)dGDP^t + \\ &\left(\frac{1}{2}\frac{GDP^0}{GDP^t} + \frac{1}{2}\right)dE_2^t + \left(-\frac{1}{2}\frac{GDP^0 E_2^t}{(GDP^t)^2} - \frac{1}{2}\frac{E_2^0}{GDP^0}\right)dGDP^t + \\ &\left(\frac{1}{2}\frac{GDP^0}{GDP^t} + \frac{1}{2}\right)dE_3^t + \left(-\frac{1}{2}\frac{GDP^0 E_3^t}{(GDP^t)^2} - \frac{1}{2}\frac{E_3^0}{GDP^0}\right)dGDP^t \end{aligned} \tag{2.63}$$

## 2.2 วิธีดำเนินการ

ในวิทยานิพนธ์นี้ ข้อมูลการใช้พลังงานจะได้จากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2002) และกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน (Department of Energy Development and Promotion, 1996, 1999, 2000, 2001) ส่วนข้อมูลผลิตภัณฑ์มวลรวมจะได้จากสภาพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ (National Economic and Social Development Board, 2000, 2004) ซึ่งจะใช้ข้อมูลดังกล่าวในการคำนวณการประหยัดพลังงานในภาคอุตสาหกรรมของไทย โดยใช้ปี 2530 เป็นปีฐานเริ่มต้น ส่วนในปีอื่นๆจะใช้ปีก่อนหน้าเป็นปีฐาน

เพื่อศึกษาการประหยัดพลังงานในภาคอุตสาหกรรมของไทย และหาสาขาอุตสาหกรรมที่มีปัญหาในการประหยัดพลังงานในช่วงปี พ.ศ.2530 ถึงปี พ.ศ. 2545 โดยค่าผลิตภัณฑ์มวลรวมในภาคอุตสาหกรรม จะเป็นค่าคงที่ที่ราคาปี 2531 (1988) การศึกษาจะหาการประหยัดพลังงานในสาขาอุตสาหกรรมทั้งสามคือ สาขาเหมืองแร่ สาขาการก่อสร้าง และสาขาอุตสาหกรรมการผลิต และเนื่องจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2002) ได้แบ่งการใช้พลังงาน ในสาขาอุตสาหกรรมการผลิตออกเป็นสาขาย่อย (Figure 2.1) อีก 9 สาขาคือ

1.สาขาอาหารและเครื่องดื่ม (Food and Beverages)

2.สาขาสิ่งทอ (Textiles)

3.สาขาไม้และเครื่องเรือน (Wood and Furniture)

4.สาขากระดาษ (Paper)

5.สาขาเคมี (Chemical)

6.สาขาอโลหะ (Non-Metallic)

7.สาขาโลหะขั้นมูลฐาน (Basic Metal)

8.สาขาผลิตภัณฑ์โลหะ (Fabricated Metal)

9.สาขาอื่นๆ (จำแนกไม่ได้) (Others (Unclassified)

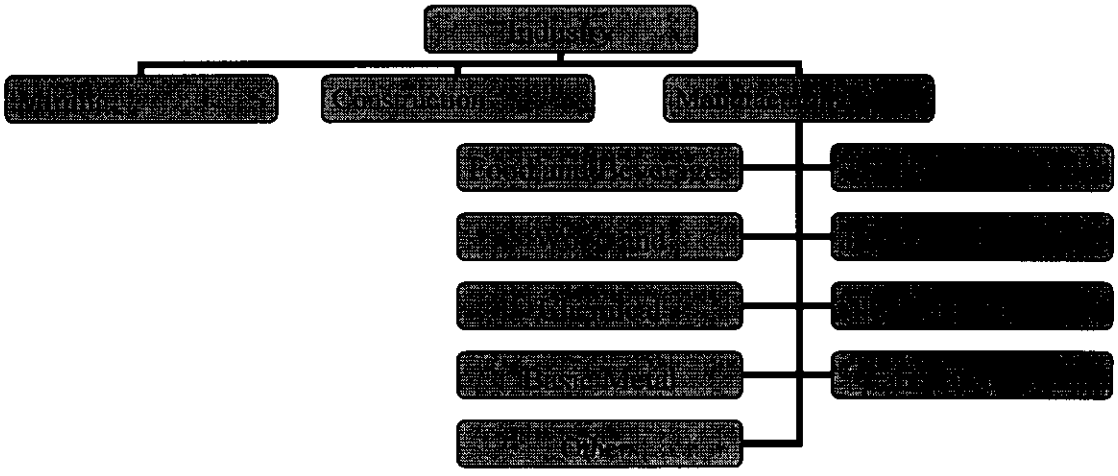

Figure 2.1 The sub-sectors of energy consumption in Thai industry

(Source: Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2002.)

### 2.2.1 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยสามารถแสดงได้ดังใน Figure 2.2 โดยจะเริ่มจากการรวบรวมข้อมูล (data collection) ที่จะใช้เป็นค่าพื้นฐานในการคำนวน หลังจากนั้นจะทำการศึกษาวิธีการสลายแบบสมบูรณ์ (study of complete decomposition method) ต่อมาก็จะเป็นการสร้างแบบจำลองการประหยัดพลังงาน ( construction of energy saving model) โดยจะทำการสร้างแบบจำลองการประหยัดพลังงานทั้งแบบ 2 และ 3 ตัวแปร หลังจากนั้นก็จะทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของการประหยัดพลังงาน (methematical model for sensitivity analysis) ต่อมาก็จะทำการประเมินการประหยัดพลังงาน (evaluation of energy saving) โดยจะประเมินการประหยัดพลังงานทั้ง 3 สาขาอุตสาหกรรม (Figure 2.1) หลังจากนั้นสาขาย่อยทั้ง 9 ของสาขาอุตสาหกรรมการผลิตก็จะได้รับการวิเคราะห์ เพื่อหาสาขาอุตสาหกรรมที่มีปัญหาในการอนุรักษ์พลังงาน ต่อมาก็จะเป็นการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของการประหยัดพลังงาน (sensitivity analysis) เพื่อดูอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการประหยัดพลังงาน สุดท้ายก็จะเป็นการสรุปผล (conclusion) การประหยัดพลังงานในภาคอุตสาหกรรมของไทย

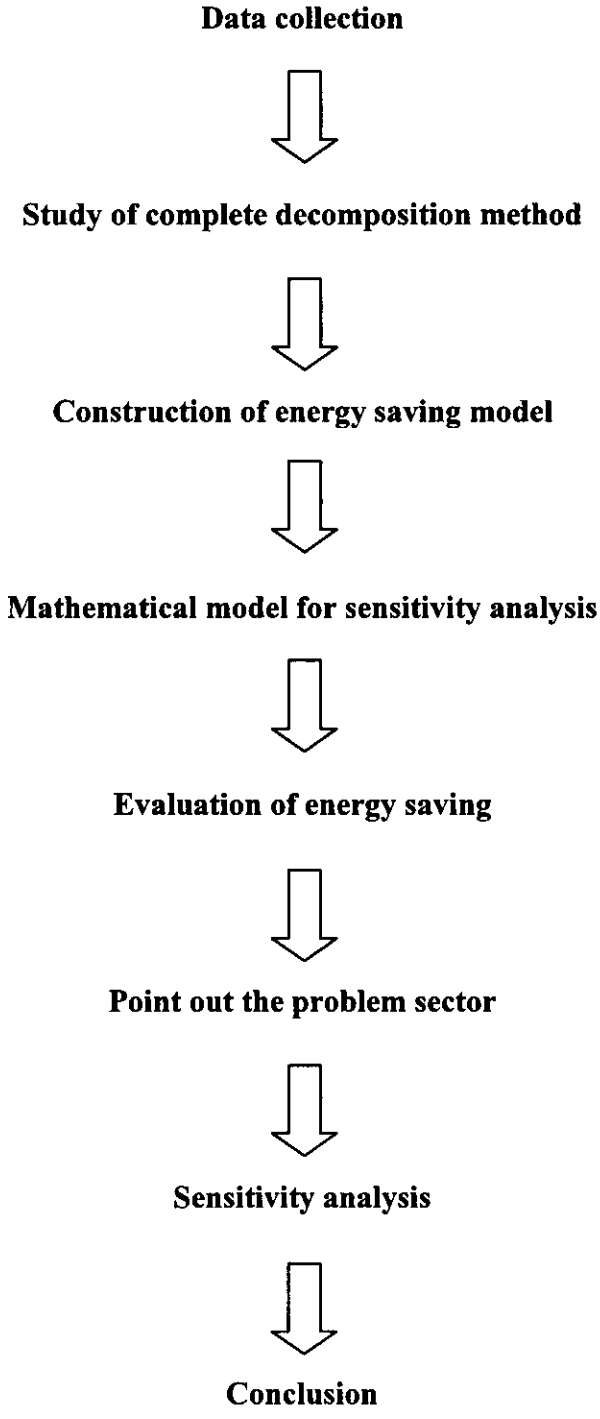


Figure 2.2 The research methodology

ซึ่งก็จะสามารถพิสูจน์การประหยัดพลังงานของภาคอุตสาหกรรมของไทย และสามารถหาสาขาอุตสาหกรรม และสาขาอุตสาหกรรมการผลิตย่อยที่มีปัญหาในการ

อนุรักษ์พลังงานในช่วงปี พ.ศ. 2530 ถึงปี พ.ศ. 2545 ได้ สำหรับขั้นตอนในการเขียนโปรแกรมการคำนวณการประหยัดพลังงาน และโปรแกรมการคำนวณการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของการประหยัดพลังงาน จะแสดงใน Figure 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

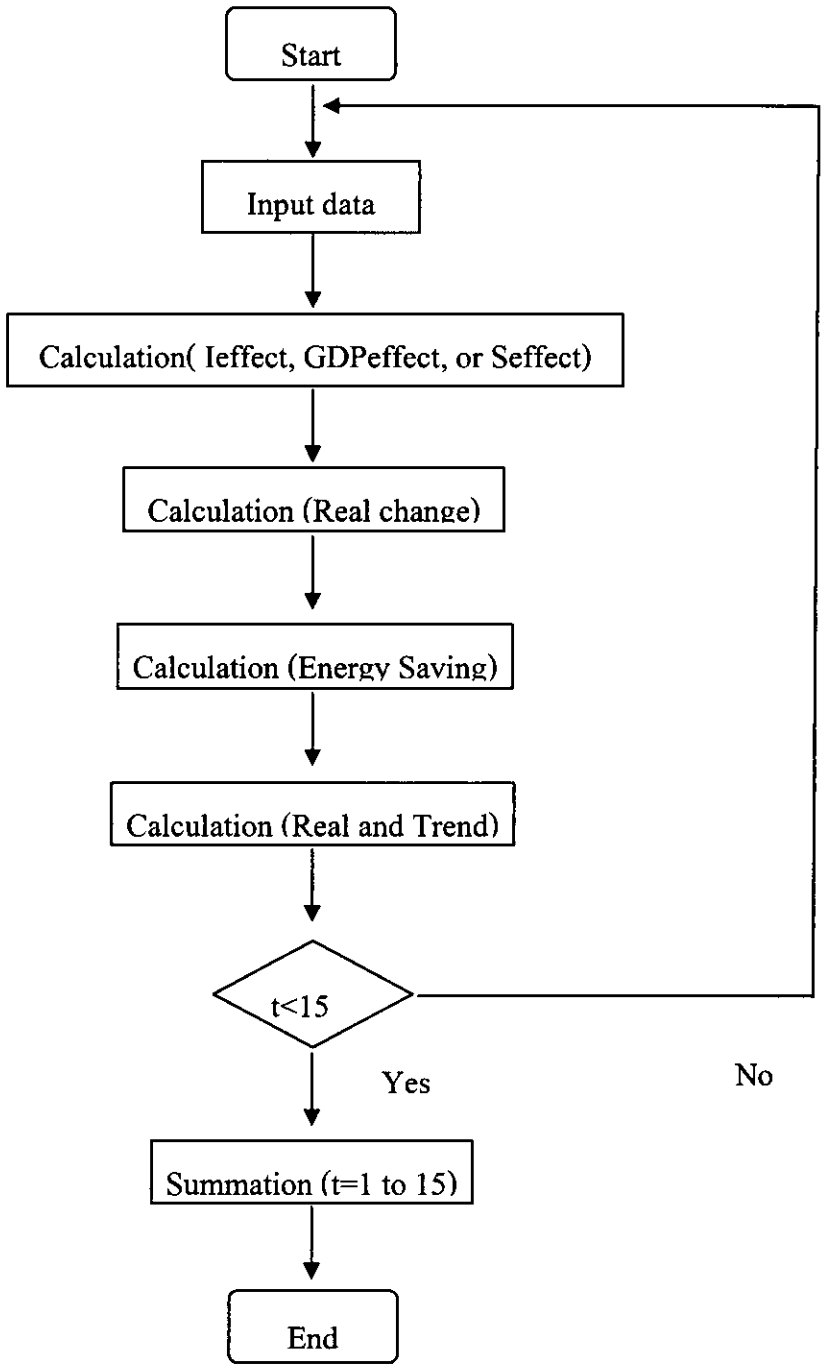


Figure 2.3 The flow chart of energy saving programming

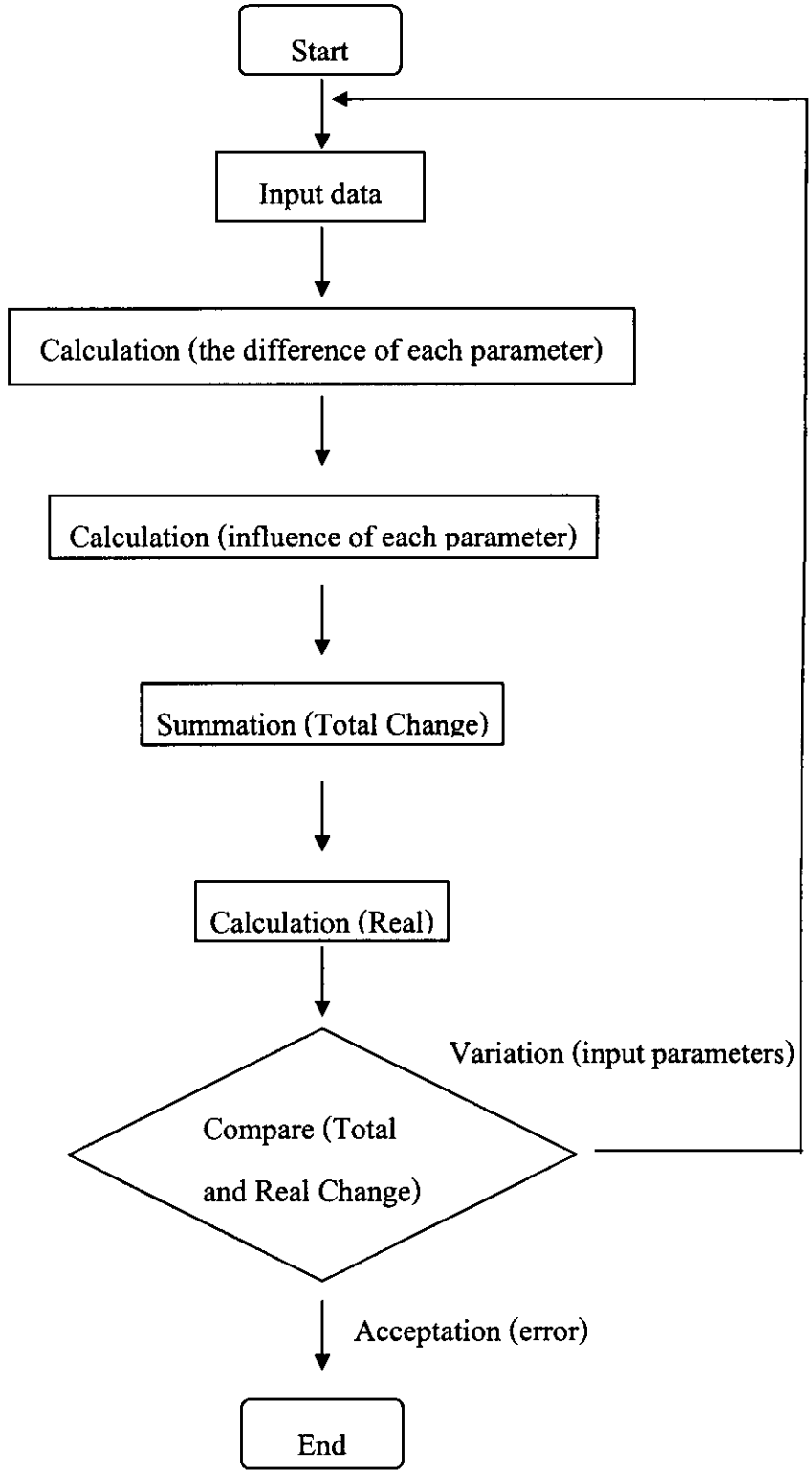


Figure 2.4 The flow chart of sensitivity analysis programming

## 2.3 วิเคราะห์ความถูกต้องของเครื่องมือ

ความถูกต้องของการคำนวณขึ้นกับการวิเคราะห์สูตร และความถูกต้องในการเขียนโปรแกรมการคำนวณ ความถูกต้องประการแรกพิสูจน์ได้จากหลักคณิตศาสตร์ แต่ความถูกต้องประการหลัง ต้องพิสูจน์จากการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงจากสมการเริ่มต้นกับการเปลี่ยนแปลงจากสมการสุดท้ายที่คำนวณด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้น สมการเริ่มต้นคือสมการที่ (2.16) และ (2.23) ส่วนสมการสุดท้ายคือสมการ (2.45) (2.46) (2.47 สำหรับการวิเคราะห์แบบ 3 ตัวแปร และสมการที่ (2.63) สำหรับการวิเคราะห์แบบ 2 ตัวแปร

จากสมการที่ (2.48) จะเห็นได้ว่าถ้า $E^t$ และ $GDP^t$ เพิ่มขึ้นหรือลดลงในอัตราที่เท่ากัน เช่น $0.1E^t$ และ $0.1GDP^t$ สมการที่ (2.48) จะกลายเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบเส้นตรง เพราะอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เท่ากัน จะทำให้สัมประสิทธิ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงตัดกันได้ ดังนั้นจะทำให้ผลของการคำนวณโดยใช้สมการเริ่มต้นคือ (2.23) จะเท่ากับผลของการคำนวณในสมการสุดท้ายคือ (2.63) สำหรับการวิเคราะห์แบบ 2 ตัวแปร เนื่องจากสูตรการคำนวณการประหยัดพลังงานในแต่ละสาขาอุตสาหรรมมีสูตรที่คล้ายกัน ดังนั้นเพื่อความกระชับจะพิสูจน์เพียงแค่ในสาขาเหมืองแร่สาขาเดียวเท่านั้น ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.3.1 หาโดยใช้สมการเริ่มต้น สำหรับแบบจำลองแบบ 2 ตัวแปร

เมื่อค่าตัวแปรพื้นฐานเปลี่ยนจากจุดเริ่มต้นไปเป็นดังต่อไปนี้

$E_1^t \rightarrow 0.1E_1^t$ และ $GDP^t \rightarrow 0.1GDP^t$ ดังนั้นสมการที่ (2.49) จะได้เป็น

$$\psi_1^0 = \frac{1}{2}\frac{GDP^0 E_1^t}{GDP^t} - \frac{1}{2}E_1^0 + \frac{1}{2}E_1^t - \frac{1}{2}\frac{GDP^t E_1^0}{GDP^0} \qquad (2.64)$$

$$\psi_1^t = \frac{1}{2}\frac{GDP^0(0.1E_1^t)}{(0.1GDP^t)} - \frac{1}{2}E_1^0 + \frac{1}{2}(0.1E_1^t) - \frac{1}{2}\frac{(0.1GDP^t)E_1^0}{GDP^0}$$

$$= \frac{1}{2}\frac{GDP^0 E_1^t}{GDP^t} - \frac{1}{2}E_1^0 + \frac{1}{2}(0.1E_1^t) - \frac{1}{2}\frac{(0.1GDP^t)E_1^0}{GDP^0} \qquad (2.65)$$

การเปลี่ยนแปลงการประหยัดพลังงานคือ สมการที่ (2.65) ลบด้วยสมการที่ (2.64) ดังนั้นจะได้คำตอบจากการคิดโดยสมการเริ่มต้นดังในสมการที่ (2.66)

$$\Delta\psi_1 = -\frac{0.9E_1^t}{2} + \frac{0.9GDP^t E_1^0}{2GDP^0} \qquad (2.66)$$

**2.3.2 หาโดยใช้สมการสุดท้าย สำหรับแบบจำลองแบบ 2 ตัวแปร**

โดยจะกำหนดการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรพื้นฐานเหมือนกับการคำนวณโดยใช้สมการเริ่มต้น ดังในหัวข้อ 2.3.1. ดังนี้

$dE_1^t = 0.1E_1^t - E_1^t = -0.9E_1^t$ และ $dGDP^t = 0.1GDP^t - GDP^t = -0.9GDP^t$

แทนค่าลงในสมการที่ (2.60) จะได้เป็น

$$d\psi_1 = \left(\frac{1}{2}\frac{GDP^0}{GDP^t} + \frac{1}{2}\right)(-0.9E_1^t) + \left(-\frac{1}{2}\frac{GDP^0 E_1^t}{(GDP^t)^2} - \frac{1}{2}\frac{E_1^0}{GDP^0}\right)(-0.9GDP^t)$$

$$= -\frac{0.9GDP^0 E_1^t}{2GDP^t} - \frac{0.9E_1^t}{2} + \frac{0.9GDP^0 E_1^t GDP^t}{2(GDP^t)^2} + \frac{0.9E_1^0 GDP^t}{2GDP^0}$$

$$= -\frac{0.9GDP^0 E_1^t}{2GDP^t} + \frac{0.9GDP^0 E_1^t}{2GDP^t} - \frac{0.9E_1^t}{2} + \frac{0.9E_1^0 GDP^t}{2GDP^0}$$

$$= -\frac{0.9E_1^t}{2} + \frac{0.9GDP^t E_1^0}{2GDP^0} \qquad (2.67)$$

จะเห็นได้ว่าคำตอบที่คำนวณจากสมการเริ่มต้น (2.66) เท่ากับคำตอบที่ได้จากการคำนวณจากสมการสุดท้าย (2.67) ซึ่งเป็นข้อพิสูจน์ได้ว่า สมการสุดท้ายมีความถูกต้อง

(จากการ derive สูตร) ดังนั้นสามารถใช้วิธีดังกล่าว เพื่อใช้ในการทดสอบว่าการเขียนโปรแกรมการคำนวณโดยคอมพิวเตอร์ถูกต้องหรือไม่ได้

โดยกำหนดค่าตัวแปรพื้นฐานจากข้อมูลการใช้พลังงานและค่าผลิตภัณฑ์มวลรวมของปี 2544 เป็นปีฐาน และปี 2545 เป็นปีใดๆ โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรพื้นฐานให้เปลี่ยนแปลงลดลงเหลือร้อยละ 10 ของค่าเดิม ดังในเงื่อนไขในหัวข้อ 2.3.1 และ 2.3.2 เมื่อคำนวณโดยสมการเริ่มต้น (2.49) และ (2.66) จะได้ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานเท่ากับ 2.93 ktoe ส่วนการใช้โปรแกรมการคำนวณโดยคอมพิวเตอร์จะได้ผลดังนี้

Table 2.1 Results of energy saving calculated by computer program of 2 dimensional model (mining sector).

| Parameters | Influence of each parameter (ktoe) |
|---|---|
| $E_1^t$ | 92.29 |
| $GDP_1^t$ | -89.36 |
| Total $\psi_1$ | 2.93 |

จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณโดยใช้สมการเริ่มต้น เท่ากับการคำนวณโดยสมการสุดท้าย คือ 2.93 ktoe แต่การคำนวณโดยสมการสุดท้ายจะมีข้อดีตรงที่ จะสามารถอธิบายถึงอิทธิพลของตัวแปรพื้นฐานแต่ละตัว เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการประหยัดพลังงานมากน้อยเพียงใดได้ ดังนั้นจึงสามารถนำผลจากการคำนวณโดยสมการสุดท้าย ไปวิเคราะห์ความอ่อนไหวของการประหยัดพลังงานได้

### 2.3.3 หาโดยใช้สมการเริ่มต้น สำหรับแบบจำลองแบบ 3 ตัวแปร

เมื่อกำหนดค่าตัวแปรพื้นฐานเปลี่ยนแปลงไปจากจุดเริ่มต้นดังต่อไปนี้

$$E_1^t \rightarrow 0.1E_1^t$$

$$Q_3^t \to 0.1Q_3^t$$

แทนค่าลงในสมการที่ (2.32) จะได้เป็น

$$\psi_1^0 = \frac{1}{3}\frac{E_1^t GDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)} - \frac{1}{6}\frac{E_1^t Q_1^0 (Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)}{Q_1^t GDP^0} - \frac{1}{3}\frac{E_1^0 (Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)}{GDP^0} + \frac{1}{6}\frac{E_1^t Q_1^0}{Q_1^t} - \frac{1}{6}\frac{E_1^0 Q_1^t}{Q_1^0} + \frac{1}{6}\frac{E_1^0 Q_1^t GDP^0}{Q_1^0 (Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)} + \frac{2}{3}E_1^t - \frac{2}{3}E_1^0 \quad (2.68)$$

$$\psi_1^t = \frac{1}{3}\frac{0.1E_1^t GDP^0}{(0.1Q_1^t+0.1Q_2^t+0.1Q_3^t)} - \frac{1}{6}\frac{0.1E_1^t Q_1^0 (0.1Q_1^t+0.1Q_2^t+0.1Q_3^t)}{0.1Q_1^t GDP^0} - \frac{1}{3}\frac{E_1^0 (0.1Q_1^t+0.1Q_2^t+0.1Q_3^t)}{GDP^0} + \frac{1}{6}\frac{0.1E_1^t Q_1^0}{0.1Q_1^t} - \frac{1}{6}\frac{E_1^0 0.1Q_1^t}{Q_1^0} + \frac{1}{6}\frac{E_1^0 0.1Q_1^t GDP^0}{Q_1^0 (0.1Q_1^t+0.1Q_2^t+0.1Q_3^t)} + \frac{2}{3}(0.1E_1^t) - \frac{2}{3}E_1^0$$

$$= \frac{1}{3}\frac{E_1^t GDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)} - \frac{1}{6}\frac{0.1E_1^t Q_1^0 (Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)}{Q_1^t GDP^0} - \frac{1}{3}\frac{0.1E_1^0 (Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)}{GDP^0} + \frac{1}{6}\frac{E_1^t Q_1^0}{Q_1^t} - \frac{1}{6}\frac{0.1E_1^0 Q_1^t}{Q_1^0} + \frac{1}{6}\frac{E_1^0 Q_1^t GDP^0}{Q_1^0 (Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)} + \frac{2}{3}(0.1E_1^t) - \frac{2}{3}E_1^0 \quad (2.69)$$

การเปลี่ยนแปลงการประหยัดพลังงานคือ สมการที่ (2.69) ลบด้วยสมการที่ (2.68) ดังนั้นจะได้คำตอบจาการคำนวณโดยใช้สมการเริ่มต้นดังในสมการที่ (2.70)

$$\Delta\psi_1 = \frac{0.9E_1^t Q_1^0 (Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)}{6Q_1^t GDP^0} + \frac{0.9E_1^0 (Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)}{3GDP^0} + \frac{0.9E_1^0 Q_1^t}{6Q_1^0} - \frac{1.8E_1^t}{3} \quad (2.70)$$

### 2.3.4 หาโดยใช้สมการสุดท้าย สำหรับแบบจำลองแบบ 3 ตัวแปร

โดยแทนค่าตัวแปรพื้นฐานเช่นเดียวกับในหัวข้อ 2.3.3 ดังนี้

$$dE_1^t = 0.1E_1^t - E_1^t = -0.9E_1^t$$

$$dE_1^t = 0.1E_1^t - E_1^t = -0.9E_1^t$$

$$dQ_1^t = 0.1Q_1^t - Q_1^t = -0.9Q_1^t$$

$$dQ_2^t = 0.1Q_2^t - Q_2^t = -0.9Q_2^t$$

$$dQ_3^t = 0.1Q_3^t - Q_3^t = -0.9Q_3^t$$

แทนค่าลงในสมการที่ (2.45) จะได้เป็น

$$d\psi_1 = \left(\frac{1}{3}\frac{GDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)} - \frac{1}{6}\frac{Q_1^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)}{Q_1^tGDP^0} + \frac{1}{6}\frac{Q_1^0}{Q_1^t} + \frac{2}{3}\right)(-0.9E_1^t) +$$

$$\left(-\frac{1}{3}\frac{E_1^tGDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2} + \frac{1}{6}\frac{E_1^tQ_1^0}{GDP^0}\left(\frac{Q_2^t+Q_3^t}{(Q_1^t)^2}\right) - \frac{1}{3}\frac{E_1^0}{GDP^0} - \frac{1}{6}\frac{E_1^tQ_1^0}{(Q_1^t)^2} - \frac{1}{6}\frac{E_1^0}{Q_1^0} + \frac{1}{6}\frac{E_1^0GDP^0}{Q_1^0}\left(\frac{Q_2^t+Q_3^t}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}\right)\right)(-0.9Q_1^t) +$$

$$\left(-\frac{1}{3}\frac{E_1^tGDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2} - \frac{1}{6}\frac{E_1^tQ_1^0}{Q_1^tGDP^0} - \frac{1}{3}\frac{E_1^0}{GDP^0} - \frac{1}{6}\frac{E_1^0Q_1^tGDP^0}{Q_1^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}\right)(-0.9Q_2^t) +$$

$$\left(-\frac{1}{3}\frac{E_1^tGDP^0}{(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2} - \frac{1}{6}\frac{E_1^tQ_1^0}{Q_1^tGDP^0} - \frac{1}{3}\frac{E_1^0}{GDP^0} - \frac{1}{6}\frac{E_1^0Q_1^tGDP^0}{Q_1^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}\right)(-0.9Q_3^t)$$

$$= \left(-\frac{0.9E_1^tGDP^0}{3(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)} + \frac{0.9E_1^tQ_1^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)}{6Q_1^tGDP^0} - \frac{0.9E_1^tQ_1^0}{6Q_1^t} - \frac{1.8E_1^t}{3}\right) +$$

$$\left(\frac{0.9Q_1^tE_1^tGDP^0}{3(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2} - \frac{0.9Q_1^tE_1^tQ_1^0(Q_2^t+Q_3^t)}{6GDP^0(Q_1^t)^2} + \frac{0.9Q_1^tE_1^0}{3GDP^0} + \frac{0.9Q_1^tE_1^tQ_1^0}{6(Q_1^t)^2} + \frac{0.9Q_1^tE_1^0}{6Q_1^0} - \frac{0.9Q_1^tE_1^0GDP^0(Q_2^t+Q_3^t)}{6Q_1^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}\right) +$$

$$\left(\frac{0.9Q_2^tE_1^tGDP^0}{3(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2} + \frac{0.9Q_2^tE_1^tQ_1^0}{6Q_1^tGDP^0} + \frac{0.9Q_2^tE_1^0}{3GDP^0} + \frac{0.9Q_2^tE_1^0Q_1^tGDP^0}{6Q_1^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}\right) +$$

$$\left(\frac{0.9Q_3^tE_1^tGDP^0}{3(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2} + \frac{0.9Q_3^tE_1^tQ_1^0}{6Q_1^tGDP^0} + \frac{0.9Q_3^tE_1^0}{3GDP^0} + \frac{0.9Q_3^tE_1^0Q_1^tGDP^0}{6Q_1^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}\right)$$

$$=\left(-\frac{0.9E_1^tGDP^0}{3(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)}+\frac{0.9E_1^tQ_1^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)}{6Q_1^tGDP^0}-\frac{0.9E_1^tQ_1^0}{6Q_1^t}-\frac{1.8E_1^t}{3}\right)+$$
$$\left(\frac{0.9Q_1^tE_1^tGDP^0}{3(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}-\frac{0.9E_1^tQ_1^0(Q_2^t+Q_3^t)}{6GDP^0Q_1^t}+\frac{0.9Q_1^tE_1^0}{3GDP^0}+\frac{0.9E_1^tQ_1^0}{6Q_1^t}+\right.$$
$$\left.\frac{0.9Q_1^tE_1^0}{6Q_1^0}-\frac{0.9Q_1^tE_1^0GDP^0(Q_2^t+Q_3^t)}{6Q_1^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}\right)+$$
$$\left(\frac{0.9Q_2^tE_1^tGDP^0}{3(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}+\frac{0.9Q_2^tE_1^tQ_1^0}{6Q_1^tGDP^0}+\frac{0.9Q_2^tE_1^0}{3GDP^0}+\frac{0.9Q_2^tE_1^0Q_1^tGDP^0}{6Q_1^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}\right)+$$
$$\left(\frac{0.9Q_3^tE_1^tGDP^0}{3(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}+\frac{0.9Q_3^tE_1^tQ_1^0}{6Q_1^tGDP^0}+\frac{0.9Q_3^tE_1^0}{3GDP^0}+\frac{0.9Q_3^tE_1^0Q_1^tGDP^0}{6Q_1^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}\right)$$

$$=\left(\begin{array}{l}-\dfrac{0.9E_1^tGDP^0}{3(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)}+\\ \dfrac{0.9E_1^tQ_1^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)-0.9E_1^tQ_1^0(Q_2^t+Q_3^t)+0.9Q_2^tE_1^tQ_1^0+0.9Q_3^tE_1^tQ_1^0}{6Q_1^tGDP^0}-\dfrac{1.8E_1^t}{3}\end{array}\right)+$$
$$\left(\frac{0.9Q_1^tE_1^tGDP^0+0.9Q_2^tE_1^tGDP^0+0.9Q_3^tE_1^tGDP^0}{3(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}+\frac{0.9Q_1^tE_1^0+0.9Q_2^tE_1^0+0.9Q_3^tE_1^0}{3GDP^0}+\right.$$
$$\left.\frac{0.9Q_1^tE_1^0}{6Q_1^0}-\frac{0.9Q_1^tE_1^0GDP^0(Q_2^t+Q_3^t)+0.9Q_2^tE_1^0Q_1^tGDP^0+0.9Q_3^tE_1^0Q_1^tGDP^0}{6Q_1^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)^2}\right)$$

$$=\left(\begin{array}{l}-\dfrac{0.9E_1^tGDP^0}{3(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)}+\dfrac{0.9E_1^tQ_1^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)}{6Q_1^tGDP^0}\\ -\dfrac{1.8E_1^t}{3}\end{array}\right)+$$
$$\left(\frac{0.9E_1^tGDP^0}{3(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)}+\frac{0.9Q_1^tE_1^0+0.9Q_2^tE_1^0+0.9Q_3^tE_1^0}{3GDP^0}+\right.$$
$$\left.\frac{0.9Q_1^tE_1^0}{6Q_1^0}\right)$$

$$=\left(\frac{0.9E_1^tQ_1^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)}{6Q_1^tGDP^0}-\frac{1.8E_1^t}{3}\right)+\left(\frac{0.9E_1^0(Q_1^t+Q_2^t+Q_3^t)}{3GDP^0}+\frac{0.9Q_1^tE_1^0}{6Q_1^0}\right) \quad (2.71)$$

จะเห็นได้ว่าคำตอบที่คำนวณจากสมการเริ่มต้น (2.70) เท่ากับคำตอบที่ได้จากการคำนวณจากสมการสุดท้าย (2.71) ซึ่งเป็นข้อพิสูจน์ได้ว่า สมการสุดท้ายมีความถูกต้อง ดังนั้นสามารถใช้วิธีดังกล่าว เพื่อใช้ในการทดสอบว่าการเขียนโปรแกรมการคำนวณโดยคอมพิวเตอร์ถูกต้องหรือไม่ได้

โดยกำหนดค่าตัวแปรพื้นฐานจากข้อมูลการใช้พลังงานและค่าผลิตภัณฑ์มวลรวมของปี 2544 เป็นปีฐาน และปี 2545 เป็นปีใดๆ โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรพื้นฐานให้เปลี่ยนแปลงลดลงเหลือร้อยละ 10 ของค่าเดิม ดังในเงื่อนไขในหัวข้อ 2.3.3 และ 2.3.4 เมื่อคำนวณโดยสมการเริ่มต้น (2.32) และ (2.70) จะได้ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานเท่ากับ 2.95 ktoe ส่วนการใช้โปรแกรมการคำนวณโดยคอมพิวเตอร์จะได้ผลดังนี้

Table 2.2 Results of energy saving calculated by computer program of 3 dimensional model (mining sector).

| Parameters | Influence of each parameter (ktoe) |
|---|---|
| $E_1^t$ | 92.33 |
| $Q_1^t$ | -4.79 |
| $Q_2^t$ | -5.38 |
| $Q_3^t$ | -79.21 |
| Total $\psi_1$ | 2.95 |

จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณโดยใช้สมการเริ่มต้น เท่ากับการคำนวณโดยสมการสุดท้าย คือ 2.95 ktoe

### 2.3.5 การวิเคราะห์โดยปัจจัยเริ่มต้น

ปัจจัยเริ่มต้นคือ $I_{effect}$, $S_{effect}$, และ $GDP_{effect}$ เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของผลกระทบของปัจจัยเริ่มต้น จากสมการที่ (2.15) ดังนั้นสมการที่ (2.26) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$d\psi = dI_{effect,1} + dS_{effect,1} + dI_{effect,2} + dS_{effect,2} + dI_{effect,3} + dS_{effect,3} \tag{2.72}$$

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสูตรทั่วไปได้ดังนี้

$$d\psi = \sum_{i}^{n} dI_{effect,i} + \sum_{i}^{n} dS_{effect,i} \tag{2.73}$$

โดยสามารถหาการเปลี่ยนแปลง ผลกระทบจากการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์มวลรวม ในสาขาอุตสาหกรรมใดๆ ได้จากสมการที่ (2.74)

$$\begin{aligned} dI_{effect,i} = & \left(\frac{1}{3}\frac{Q_i^0}{Q_i^t} + \frac{1}{6}\frac{GDP^0}{GDP^t} + \frac{1}{6}\frac{Q_i^0 GDP^t}{GDP^0 Q_i^t} + \frac{1}{3}\right) dE_i^t + \\ & \left(\begin{array}{l} -\frac{1}{3}\frac{Q_i^0 E_i^t}{(Q_i^t)^2} - \frac{1}{6}\frac{GDP^0 E_i^t}{(GDP^t)^2} - \frac{1}{6}\frac{GDP^0 E_i^0 (GDP^t - Q_i^t)}{Q_i^0 (GDP^t)^2} \\ -\frac{1}{6}\frac{Q_i^0 E_i^t (GDP^t - Q_i^t)}{GDP^0 (Q_i^t)^2} - \frac{1}{6}\frac{E_i^0}{GDP^0} - \frac{1}{3}\frac{E_i^0}{Q_i^0} \end{array}\right) dQ_i^t + \\ & \left(-\frac{1}{6}\frac{GDP^0 E_i^t}{(GDP^t)^2} + \frac{1}{6}\frac{GDP^0 Q_i^t E_i^0}{Q_i^0 (GDP^t)^2} + \frac{1}{6}\frac{Q_i^0 E_i^t}{GDP^0 Q_i^t} - \frac{1}{6}\frac{E_i^0}{GDP^0}\right)(dGDP^t - dQ_i^t) \end{aligned} \tag{2.74}$$

และสามารถหาการเปลี่ยนแปลงผลกระทบจากโครงสร้างเศรษฐกิจ ในสาขาอุตสาหกรรมใดๆ ได้จากสมการที่ (2.75)

$$\begin{aligned} dS_{effect,i} = & \left(\frac{1}{6}\frac{GDP^0}{GDP^t} - \frac{1}{6}\frac{Q_i^0}{Q_i^t} - \frac{1}{3}\frac{Q_i^0 GDP^t}{GDP^0 Q_i^t} + \frac{1}{3}\right) dE_i^t + \\ & \left(\begin{array}{l} \frac{1}{3}\frac{GDP^0 E_i^0 (GDP^t - Q_i^t)}{Q_i^0 (GDP^t)^2} - \frac{1}{6}\frac{GDP^0 E_i^t}{(GDP^t)^2} + \frac{1}{6}\frac{E_i^0}{Q_i^0} + \frac{1}{6}\frac{Q_i^0 E_i^t}{(Q_i^t)^2} \\ -\frac{1}{6}\frac{E_i^0}{GDP^0} + \frac{1}{3}\frac{Q_i^0 E_i^t (GDP^t - Q_i^t)}{GDP^0 (Q_i^t)^2} \end{array}\right) dQ_i^t \\ & \left(-\frac{1}{3}\frac{Q_i^t GDP^0 E_i^0}{Q_i^0 (GDP^t)^2} - \frac{1}{6}\frac{GDP^0 E_i^t}{(GDP^t)^2} - \frac{1}{6}\frac{E_i^0}{GDP^0} - \frac{1}{3}\frac{Q_i^0 E_i^t}{GDP^0 Q_i^t}\right)(dGDP^t - dQ_i^t) \end{aligned} \tag{2.75}$$

เพื่อพิสูจน์ว่าสมการที่ (2.73) (2.74) และ (2.75) มีความถูกต้อง ดังนั้นจะนำสมการเหล่านี้เขียนโปรแกรมการคำนวณโดยคอมพิวเตอร์ โดยใช้เงื่อนไขต่างๆและค่าตัวแปรพื้นฐานเช่นเดียวกับที่ใช้ในหัวข้อ 2.3.4 ซึ่งจะได้ผลการคำนวณดังดังต่อไปนี้

Table 2.3 Results of energy saving calculated by a computer program of 3 dimension model (mining sector)

| Parameters | Influence of each parameter (ktoe) | | Total $\psi_1$ |
|---|---|---|---|
| | $I_{effect}$ | $S_{effect}$ | |
| $E_1'$ | 90.66 | 1.67 | 92.33 |
| $Q_1'$ | -89.41 | 84.62 | -4.79 |
| $Q_2'$ | 0.00 | -5.38 | -5.38 |
| $Q_3'$ | 0.01 | -79.22 | -79.21 |
| Total $\psi_1$ | 1.26 | 1.69 | 2.95 |

จะเห็นได้ว่าผลของการคำนวณโดยใช้สมการสุดท้ายในสมการที่ (2.73) (2.74) และ (2.75) มีค่าเท่ากับผลการคำนวณใน Table 2.2 ที่ใช้สมการสุดท้ายที่ (2.45) และเท่ากับผลการคำนวณโดยใช้สมการเริ่มต้นที่ (2.32) และ (2.70) เหล่านี้จึงเป็นข้อพิสูจน์ได้ว่าสมการที่ใช้ในการคำนวณ ตลอดจนการเขียนโปรแกรมการคำนวณโดยคอมพิวเตอร์ มีความถูกต้อง

การใช้สมการสุดท้ายในสมการที่ (2.45) (2.46) และ (2.47) จะสามารถบอกได้เพียงอิทธิพลของตัวแปรพื้นฐานแต่ละตัว ว่ามีผลอย่างไรต่อการเปลี่ยนแปลงการประหยัดพลังงาน แต่จะไม่สามารถอธิบายอิทธิพลของผลกระทบจากการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์มวลรวม และผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเศรษฐกิจได้ แต่อิทธิพลของทั้งสองนี้สามารถอธิบายได้โดยการใช้สมการสุดท้ายที่ (2.73) (2.74) และ (2.75) ได้ ดังใน Table 2.3

ดังนั้นสามารถนำสมการสุดท้าย ไปใช้เป็นเครื่องมือในการอธิบายอิทธิพลของตัวแปรพื้นฐานแต่ละตัว และอิทธิพลของผลกระทบทั้งสองได้ ดังใน Table 3.10 โดย

กำหนดปี 2544 เป็นปีฐาน และปี 2545 เป็นปีใดๆ โดยกำหนดให้ค่าตัวแปรพื้นฐานเปลี่ยนไปจากค่าเริ่มต้นร้อยละ 1

## 2.4 สรุป

ในบทที่ 2 นี้ได้เสนอทฤษฎีการประหยัดพลังงานที่สัมพันธ์กับปัจจัยต่าง ๆ ทางเศรษฐศาสตร์ ได้แก่ energy intensity, economic structure และ GDP ทั้งแบบ 3 มิติ และ 2 มิติ การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของปัจจัยต่าง ๆ สามารถใช้ประเมินความสำคัญของแต่ละปัจจัยที่ระดับต่าง ๆ ได้ ความถูกต้องของการวิเคราะห์ได้แสดงให้เห็นโดยความสอดคล้องของการคำนวณหลายรูปแบบ สมการต่าง ๆ ในบทนี้จึงใช้เพื่อการศึกษาในบทต่อ ๆ ไป