บทที่ 4

การคำนวณผลตัวแปรการออกแบบต่อกำลังงานสูญเสีย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรมแบบจำลองเพื่อคำนวณผลของตัวแปรการออกแบบที่มีผลต่อกำลังงานสูญเสีย ทั้งส่วนของเครื่องยนต์และส่วนของยานยนต์ โดยการคำนวณนี้จะกระทำด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยโปรแกรมแบบจำลองนี้ใช้ภาษาฟอร์แทรน 77 ซึ่ง Compiler ด้วย MS-FORTRAN compiler ของ Microsoft (R) Fortran Optimizing Compiler Version 5.00 ทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล รุ่น Pentium 100 MHz. RAM 40 MHz โปรแกรมที่พัฒนานี้ประกอบด้วย โปรแกรม Indicate ซึ่งทำหน้าที่คำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการออกแบบต่อ Net indicated power พร้อมกับคำนวณหาค่าตัวแปรที่ทำให้ Net indicated power มีค่ามากที่สุด , โปรแกรม Engine ซึ่งทำหน้าที่คำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการออกแบบต่อกำลังงานสูญเสียในส่วนของเครื่องยนต์และยานยนต์ และ โปรแกรม Optimum ทำหน้าที่คำนวณหาค่าตัวแปรการออกแบบในช่วงที่พิจารณาที่ทำให้กำลังงานสูญเสียทั้งในส่วนของเครื่องยนต์และยานยนต์มีค่าต่ำที่สุด

4.1 ข้อมูล baseline engine data

เป็นข้อมูลพื้นฐานของเครื่องยนต์แบบ 4 จังหวะ 4 สูบ 16 valve แบบ overhead camshaft ทั่วๆไป โดยถือก Toyota 4A-FE เป็นกรณีตัวอย่าง สามารถจำแนกข้อมูลเป็น 3 ส่วน ดังนี้

4.1.1) ข้อมูล baseline engine data สำหรับการคำนวณผลของตัวแปรทาง Thermodynamics

4.1.2) ข้อมูล baseline engine data สำหรับการคำนวณผลของตัวแปรการออกแบบต่อกำลังงานสูญเสียในส่วนของเครื่องยนต์

4.1.3) ข้อมูล baseline engine data สำหรับการคำนวณผลของตัวแปรการออกแบบต่อกำลังงานสูญเสียในส่วนของยานยนต์

4.1.1) ข้อมูล baseline engine data สำหรับการคำนวณผลของตัวแปรทาง Thermodynamics ประกอบด้วยดังต่อไปนี้

1.) Spark advance angle , θ_s เท่ากับ -26 degree crank angle ข้อมูลจากสมรรถนะของเครื่องยนต์ *OEM* ของโตโยต้า 4A-FE ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที ความดันท่อร่วม

ไอดี 12.6 นิ้วปรอท[42] เนื่องจากสภาวะการทำงานปกติของเครื่องยนต์อยู่ที่ 2000-3000 รอบต่อนาที ฉะนั้นจะถือว่าที่ความเร็วรอบดังกล่าวเป็นตัวแทนของการทำงานที่ความเร็วรอบปกติของเครื่องยนต์

2.) Combustion duration , θ_c เท่ากับ 40 degree crank angle จากข้อมูลของเครื่องยนต์ทั่วไป [1]

3.) Specific heat ratio , γ ของ mixture เท่ากับ 1.3 [6]

4.1.2) ข้อมูล baseline engine data สำหรับการคำนวณผลของตัวแปรการออกแบบต่อกำลังงานสูญเสียในส่วนของเครื่องยนต์ ประกอบด้วยดังต่อไปนี้

1.) Piston bore , B เท่ากับ 0.081 m [44]

2.) Crank arm , a เท่ากับ 0.0385 m [44]

3.) Connecting rod length , l ความยาวของ connecting rod ของเครื่องยนต์ในรุ่นต่างๆมีค่าใกล้เคียงกัน โดยข้อมูลความยาวเฉลี่ยจาก Standard geometry ของ Petrol engine ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์จะเลือกให้ l = 0.14 m[27]

4.) Connecting rod length to crank arm ratio , (r = l/a) เท่ากับ 3.636 ได้จากอัตราส่วนของ connecting rod length กับ crank arm

5.) Pressure ring width , b'_{pres} เท่ากับ 3.5 mm ข้อมูลจากการทดสอบแรงเสียดทานที่เกิดจากแหวนอัดของเครื่องยนต์ลูกสูบเดียว ขนาด 137 mm , stroke length 135 mm เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากทางทฤษฎี [7]

6.) Oil ring width , b'_{oil} เท่ากับ 1.1 mm ข้อมูลจากการทดสอบแรงเสียดทานที่เกิดจากแหวนน้ำมันของเครื่องยนต์ฮีโน่ลูกสูบเดียว ขนาด 137 mm , stroke length 135 mm เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากทางทฤษฎี [7]

7.) จำนวน pressure ring , n_{pres} เท่ากับ 2 ข้อมูลจากการทดสอบแรงเสียดทานที่เกิดจากแหวนอัดของเครื่องยนต์ฮีโน่ลูกสูบเดียว ขนาด 137 mm , stroke length 135 mm เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากทางทฤษฎี[7] ซึ่งจำนวนแหวนในเครื่องยนต์เบนซินทั่วๆไปมีจำนวน 2 วงเช่นกัน

8.) จำนวน number oil ring , n_{oil} เท่ากับ 1 ข้อมูลจากการทดสอบแรงเสียดทานที่เกิดจากแหวนน้ำมันของเครื่องยนต์ฮีโน่ลูกสูบเดียว ขนาด 137 mm , stroke length 135 mm เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากทางทฤษฎี [7]

9.) Oil minimum thickness , h'_2 เท่ากับ 5 μm ข้อมูลความหนาน้ำมันจากการทดสอบวัดค่าเฉลี่ยความหนาน้ำมันที่middle stroke ที่ความเร็วรอบ 1000 rev/min ของเครื่องยนต์ diesel engine[23]

10.) Skirt length , L_{skirt} เท่ากับ 0.04 m. จากข้อมูลของลูกสูบขนาด 0.083 m , crank arm 0.041 m [23] เนื่องจาก skirt length ในเครื่องยนต์เบนซินที่มีปริมาตรกระบอกสูบใกล้เคียงกันนั้นจะมีค่า skirt length ที่ไม่แตกต่างกัน สามารถใช้เป็นข้อมูลทั่วๆไปได้เช่นกัน

11.) Absolute viscosity , μ เท่ากับ 0.0136 Pa.s ข้อมูลการน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ควบคุมน้ำหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 80 ° C , ใช้ในการทดสอบเครื่องยนต์ [7]

12.) Piston clearance , C_p เท่ากับ 0.07 mm. จากการเลือกค่าของ piston clearace จากกลางช่วงระหว่าง 0.06-0.08 mm [44]

13.) Radius clearance at big-end side , C_{big} เท่ากับ 0.035 mm. จากการเลือกค่ากลางช่วงระหว่าง 0.02-0.051 mm [44]

14.) Radius bearing at big-end side , R_{big} เท่ากับ 0.024 m [44]

15.) Bearing width at big-end side, L_{big} เท่ากับ 0.022 m. Standard geometry ของ Petrol engine[24]

16.) Eccenticity ratio at big-end side,ε_{big} ประมาณ 0.9 ได้จากสมการความสัมพันธ์ของความหนาของชั้นน้ำมัน และ radius clearance, $\varepsilon\cos\beta = (1-\frac{h}{c})$ ที่ตำแหน่ง $\beta = 180$ โดยข้อมูลในการออกแบบของตัว journal bearing ทั่วไป สามารถรองรับความหนาต่ำสุดของชั้นน้ำมัน 2-3 μm [1]

17.) Radius clearance at small-end , C_{small} เท่ากับ 0.018 mm จากข้อมูลของ journal bearing[31]

18.) Radius bearing at small-end side , R_{small} เท่ากับ 0.011 m. จากข้อมูลของขนาดสลักลูกสูบของรถยนต์ มาสด้า 616 ขนาด 1600 cc [45] เนื่องจากขนาดสลักลูกสูบในเครื่องยนต์เบนซินที่มีปริมาตรกระบอกสูบใกล้เคียงกันนั้นจะมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน สามารถใช้เป็นข้อมูลทั่วๆไปได้เช่นกัน

19.) Bearing width at small-end side, L_{small} เท่ากับ 0.022 m ประมาณเท่ากับ bearing width at big-end

20.) Eccenticity ratio at small-end side , ε_{small} เท่ากับ 0.9 ประมาณเท่ากับ ε ของ big-end

21.) Radius clearance in crankshaft bearing , C_{crank} 0.024 mm. จากการเลือกค่ากลางช่วงระหว่าง 0.015-0.033 mm [44]

22.) Radius bearing in crankshaft bearing , R_{crank} เท่ากับ 0.024 m. [44]

23.) Bearing width in crankshaft bearing , L_{crank} เท่ากับ 0.022 m. ประมาณเท่ากับ bearing width in connecting rod bearing

24.) Eccentricity ratio,ε_{crank} เท่ากับ 0.9 ได้จากสมการความสัมพันธ์ของความหนาของชั้นน้ำมันและ radius clearance , $\varepsilon\cos\beta = (1-\frac{h}{c})$ ที่ตำแหน่ง $\beta = 180$ โดยข้อมูลในการออกแบบของตัว journal bearing โดยทั่วไปสามารถรองรับความหนาต่ำสุดของน้ำมัน 2-3 μm[1]

25.) Number bearing in crankshaft , n_b เท่ากับ 5 [44]

26.) Valve follower mass , m ประมาณเท่ากับ 0.1 kg ข้อมูลของ follower effective mass ในเครื่องยนต์ Petrol engine [10]

27.) Spring stiffness , K เท่ากับ 24000 N/m ได้จากค่าข้อมูล spring stiffness ในช่วง 22.4-24.3 N/mm^2 [44]

28.) Valve preloading , F_{pl} เท่ากับ 155 N [44]

29.) Cam tip radius , r เท่ากับ 2.5 mm. ได้จากข้อมูลของ cam surface แบบ Petter AV1 เครื่องยนต์ diesel [11] ซึ่ง cam surface นี้เป็น surface แบบ simple design และข้อมูลจากการวัดจริงของเครื่องยนต์โตโยต้ารุ่น 4A-FE ประมาณ 2.5-3.5 mm.

30.) Cam base radius,R เท่ากับ 15.9 mm. ได้จากข้อมูลของ cam surface แบบ Petter AV1 เครื่องยนต์ diesel[11] และข้อมูลจากการวัดจริงของเครื่องยนต์โตโยต้ารุ่น 4A-FE ประมาณ 15-17 mm.

31.) Starting angle , ϕ เป็นมุมเริ่มต้นในการยก valve follower โดยมุมนั้นเทียบกับแนวนอน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 31 degree ได้จากข้อมูลของ cam surface แบบ Petter AV1 ของเครื่องยนต์ diesel [11] ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวัดจริงของเครื่องยนต์โตโยต้ารุ่น 4A-FE ประมาณ 20-30 degree

32.) Friction coefficient on cam surface , μ_c เท่ากับ 0.11 ได้จากข้อมูลในการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยมีน้ำมันหล่อลื่น 10W30 GM ควบคุมอุณหภูมิน้ำมันถึง 125 °C ที่ความเร็วรอบ cam speed 300-1500 รอบต่อนาที แบบ overhead cam shaft[12]

33.) จำนวน valve ต่อกระบอกสูบ , n_{valve} เท่ากับ 4 [44]

34.) Valve follower lift , L_{lift} เท่ากับ 10 mm [44]

35.) Compression ratio , R_c เท่ากับ 9.5 [44]

36.) Inlet vale head diameter , D_{iv} เท่ากับ 0.03 m ได้จากข้อมูลของ valve head diameter ของห้องเผาไหม้แบบ four valve pent-roof มีค่าเท่ากับ 0.37 เท่าของขนาดลูกสูบ[1]

37.) Compression efficiency , e_c เท่ากับ 0.7 เป็นข้อมูลทั่วๆ ไป สำหรับ open type reciprocating compressor [15]

38.) Mechanical efficiency in compressor , e_m. โดยทั่วไปประมาณเท่ากับ 0.8 [34]

39.) Condensing pressure หรือ high pressure, P_2 เท่ากับ 1530 kPa ได้จากข้อมูลการทำงานปกติของระบบปรับอากาศในรถยนต์ [35]

40.) Evaporating pressure หรือ low pressure , P_1 เท่ากับ 255 kPa ได้จากข้อมูลการทำงานปกติของระบบปรับอากาศในรถยนต์ [35]

41.) Piston bore in compressor , B_{com} เท่ากับ 0.048 m ได้จากข้อมูลของ compressor รุ่น HG500 จำนวน 1 กระบอกสูบ โดยใช้ในรถยนต์ทั่วๆไป[26]

42.) Piston stroke length in compressor , L_{com} เท่ากับ 0.048 m ได้จากข้อมูลของ compressor รุ่น HG500 จำนวน 1 กระบอกสูบ โดยใช้ในรถยนต์ทั่วๆไป[26]

43.) Cooling load ประมาณ 2500 W เป็นข้อมูลที่เกิดขึ้นในห้องโดยสารที่สภาวะอุณหภูมิภายนอกรถยนต์ 35 องศาเซลเซียส มีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 และ อุณหภูมิภายในรถยนต์ 25 องศาเซลเซียส ในขณะที่แสงแดดจัด [35]

44.) Rotor diameter in alternator , D_a เท่ากับ 0.115 m ได้จากข้อมูลของมาตราฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับในรถยนต์ [47]

45.) Rotor length in alternator , L_a เท่ากับ 0.1 m ได้จากข้อมูลของมาตราฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับในรถยนต์ [47]

46.) ขนาด Alternator กำหนดขนาดเท่ากับ 50 Amp. , ที่แรงดันไฟฟ้า 12 Voltage.[47]

47.) Percent clearance , m_c โดย reciprocating compressor ทั่วๆไปเป็นค่าคงที่ อยู่ระหว่าง 4-5 % [15] สำหรับค่าที่ใช้คือค่ากลางของช่วงซึ่งจะเท่ากับ 4.5 %

48.) อัตราทดของ pulley ที่ crankshaft ต่อ pulley ที่ compressor , r_{com} ,โดยอัตราทดของระบบ air condition ในรถยนต์โตโยต้า รุ่น soluna ปี 1997 ที่ได้จากการวัดจริงมีค่าประมาณ 1.13

49.) Correction factor , K_a , มีค่าอยู่ในช่วง 0.06-0.08 สำหรับ high speed machines โดยเลือกใช้ค่าเท่ากับ 0.06 ซึ่งเหมาะสมกับ Alternator ขนาดเล็กและเป็นแบบ high speed machines [21]

50.) อัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลาง pulley ที่ Crankshaft กับ Alternator , r_a เท่ากับ 2 [44]

4.1.3) ข้อมูล baseline engine data สำหรับการคำนวณผลของตัวแปรการออกแบบต่อกำลังงานถูกเขียนในส่วนของยานยนต์ โดยข้อมูลในส่วนของยานยนต์ ได้จากรถยนต์ โตโยต้า รุ่น โคโรลล่า ปี 1995 เครื่องยนต์ 4A-FE [39] สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

1.) Gear ratio # 1 , G_1 เท่ากับ 3.166

2.) Gear ratio # 2 , G_2 เท่ากับ 1.904

3.) Gear ratio # 3 , G_3 เท่ากับ 1.31

4.) Gear ratio # 4 , G_4 เท่ากับ 0.969

5.) Gear ratio # 5 , G_5 เท่ากับ 0.815

6.) Differential ratio , G_D เท่ากับ 4.058

7.) Drag coefficient , C_d เท่ากับ 0.33

8.) Frontal area , A_f เท่ากับ 1.94 $m.^2$

9.) Rolling coefficient , f เท่ากับ 0.01536

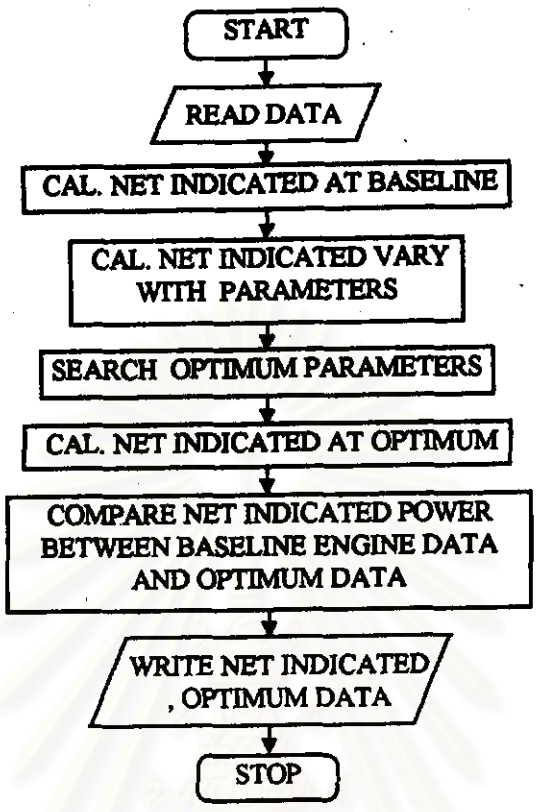
10.) Vehicle mass , m_v เท่ากับ 1110 kg.

11.) Wheel radius , R_w เท่ากับ 0.281 m.

4.2 ขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม Indicate

โปรแกรม Indicate เป็นโปรแกรมการคำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการออกแบบที่มีผลต่อ Net indicated power และ คำนวณหาตัวแปรการออกแบบที่ทำให้เกิด Net indicated power สูงที่สุด ในช่วงตัวแปรการออกแบบที่พิจารณา .. สำหรับขั้นตอนการคำนวณหลักของโปรแกรม Indicate สามารถแสดงได้จากแผนภูมิดังต่อไปนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 4.1 แสดงแผงผังการคำนวณหลักของโปรแกรม Indicate

โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

A) ขั้นแรก ของคำนวณจะเริ่มต้นใส่ข้อมูลเบื้องต้น แสดงได้ดังนี้

```
*   PLEASE ENTER DATA TO CALCULATE INDICATED POWER
*   ENTER HEAT ADDITION                 : (J/cycle/cylinder) : QIN
*   ENTER ENGINE SPEED TO CALCULATION       : (rev/min)      : RPM
*   ENTER AMOUNT OF INTERVAL OF PARAMETERS : (TIMES)         : M
```

โดยข้อมูลเบื้องต้นที่ป้อนเข้าโปรแกรม Indicate แสดงได้ดังต่อไปนี้

```
* ENTER HEAT ADDITION                (J/cycle/cylinder) :    100
* ENTER ENGINE SPEED TO CALCULATION (rev/min)           :    2600
* ENTER AMOUNT OF INTERVAL OF PARAMETERS(TIMES)         :    5
```

โดยข้อมูลเริ่มแรกที่ป้อมเข้าโปรแกรม Indicate อธิบายได้ดังนี้

QIN คือ ค่าความร้อนที่สะสมในจากเชื้อเพลิงที่ให้กับห้องเผาไหม้ , J/cycle/cylinder

RPM คือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ , รอบต่อนาที

DH คือ ความดัน manifold pressure , นิ้วปรอท

M คือ จำนวนช่วงในการคำนวณของการเปลี่ยนแปลงตัวแปร

B) ขั้นที่สอง เป็นขั้นตอนการคำนวณผล สามารถแบ่งได้ดังนี้

B1) ขั้นตอนการคำนวณหาค่า Net indicated power จากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการออกแบบทีละชุดตัวแปร โดยกำหนดให้ตัวแปรอื่นๆ ที่เหลือมีค่าคงที่ตามข้อมูล ดังที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆกับกำลังงาน Net indicated power ได้ดังนี้

$$P_{net-in} = G_1(\theta_s, \theta_b, R_c, l, n_{cyl}, N)$$

B2) เป็นขั้นตอนการคำนวณหาตัวแปรที่ทำให้เกิด Net indicated power มากที่สุดด้วยวิธี direct search method เป็นการหาค่า maximum ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบค่าจากข้อมูลการคำนวณชุดก่อนกับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณชุดปัจจุบัน โดยตัวแปรการออกแบบจะคำนวณอยู่ในช่วงตัวแปรที่พิจารณา

สำหรับลำดับการคำนวณผลสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

ก) ลำดับที่หนึ่ง เป็นการคำนวณหาค่า Net indicated power จากข้อมูล baseline engine data

ข) ลำดับที่สอง เป็นการคำนวณผลการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร θ_s, θ_b, l, R_c ต่อ Net indicated power โดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรทีละตัว และตัวที่เหลือกำหนดให้มีค่าคงที่ตาม baseline

ค) ลำดับที่สาม เป็นการคำนวณหาตัวแปรการออกแบบ ที่ทำให้ Net indicated power มีค่ามากที่สุด โดยวิธี direct search method

ง) ลำดับที่สี่ เป็นการคำนวณหาค่า Net indicated power จากข้อมูล optimum data ที่ได้จากการคำนวณในลำดับที่สาม

จ) ลำดับที่ห้า เป็นการแสดงผลการเปรียบเทียบที่ได้จากการคำนวณระหว่าง ข้อมูลจาก baseline engine data กับ ข้อมูลจาก optimum data

สำหรับการคำนวณในข้อ B1 และ B2 ค่าที่ได้จะเก็บไว้ที่แฟ้มข้อมูลชื่อ result1.out ซึ่งรายละเอียดของตัวโปรแกรม Indicate แสดงไว้ในภาคผนวก ง

ตัวอย่างแฟ้มข้อมูล result1.out ที่คำนวณได้ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

```
 CALCULATION NET INDICATED POWER VARY WITH SPARK ADVANCE
  COMPRESSION RATIO      :      8.50
  CONNECTING ROD LENGTH  :       .12  (m)

  COMBUSTION DURATION    :     36.00  (degree crank angle)
(SPARK ADVANCE,degree crank angle)    (NET-INDICATED,kW)
    -30.00                              28.28
    -28.00                              27.08
    -26.00                              25.72
    -24.00                              24.24
    -22.00                              22.68
    -20.00                              21.06
```

```
  COMBUSTION DURATION     :      37.60  (degree crank angle)
(SPARK ADVANCE,degree crank angle)    (NET-INDICATED,kW)
    -30.00                              27.32
    -28.00                              26.00
    -26.00                              24.55
    -24.00                              23.02
    -22.00                              21.43
    -20.00                              19.81
```

สำหรับตัวอย่างผลของการ optimum ของตัวแปรต่างๆในการปรับปรุงประสิทธิภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งประกอบอยู่ในท้ายของแฟ้มข้อมูล result1.out

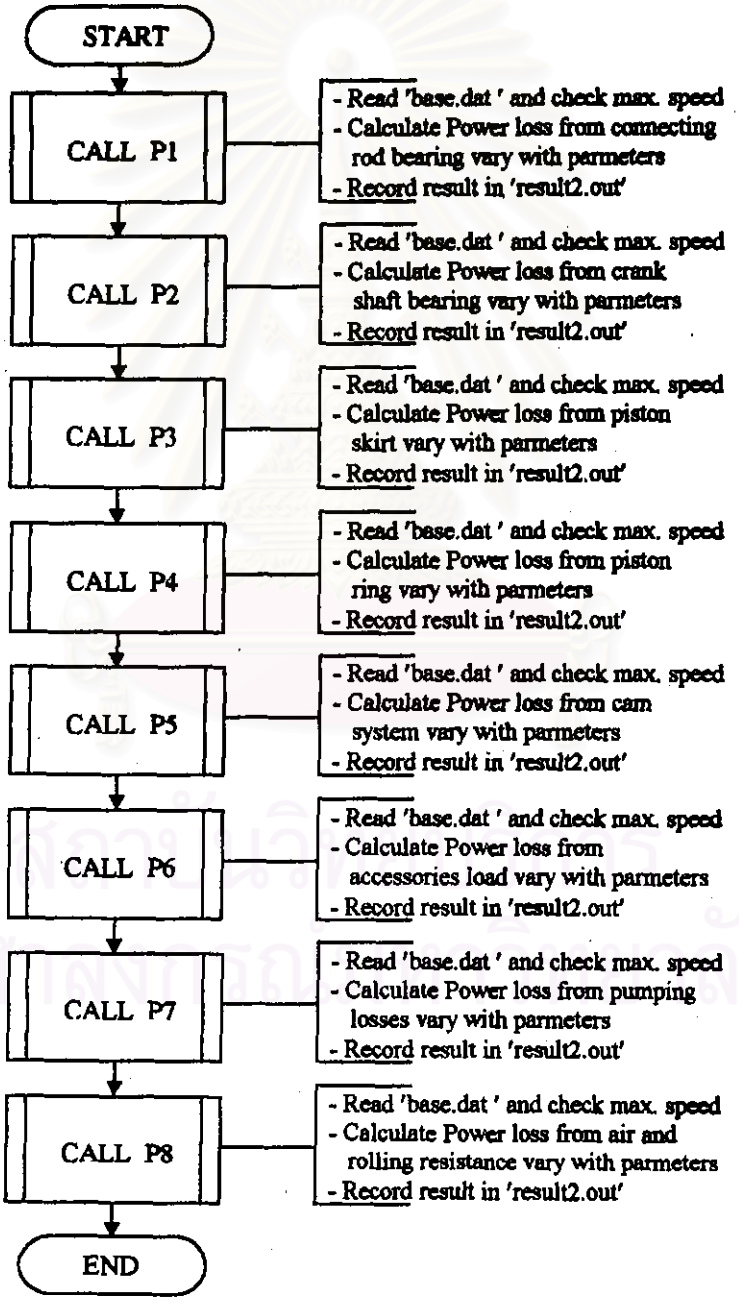
```
  OPTIMUM PARAMETERS OF INDICATED POWER
  AT   2600.00 (REV/MIN)

  SPARK ADVANCE AT            -30.00 : (degree crank angle)
  COMBUSTION DURATION          36.00 : (degree crank angle)
  CONNECTING ROD LENGTH          .16 : (m)
  COMPRESSION RATIO            10.50

  COMPARATIVE BASELINE WITH OPTIMUM DATA
  NET INDICATED AT BASELINE DATA IS     26.40  : (kW)
  NET INDICATED AT OPTIMUM DATA IS      38.06  : (kW)
  IMPROVEMENT                           44.16  : (%)
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 ขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม Engine

เป็นขั้นตอนการคำนวณผลของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรทีละตัวที่มีต่อกำลังสูญเสียแต่ละองค์ประกอบของเครื่องยนต์และยานยนต์ เมื่อกำหนดให้ตัวแปรที่เหลืออื่นๆ มีค่าคงที่ ที่แต่ละความเร็วรอบ โดยตัวแปรที่ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่นั้น จะกำหนดให้มีค่าตามข้อมูล baseline engine data ของเครื่องยนต์ และยานยนต์ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข

สำหรับขั้นตอนการคำนวณหลักของโปรแกรม Engine สามารถแสดงได้จากแผนภูมิดังต่อไปนี้



รูป 4.2 แสดงแผนผังการคำนวณหลักของโปรแกรม Engine

สำหรับขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม Engine มีรายละเอียดดังนี้

A) ขั้นที่หนึ่ง ใส่ข้อมูลเบื้องต้นในการคำนวณ ซึ่งแสดงได้ดังนี้

```
* ENTER AMOUNT OF INTERVAL OF PARAMETERS (TIMES)          :   N
* ENTER ENGINE UPPER LIMIT SPEED (rev/min)                :   RPMH
* ENTER ENGINE LOWER LIMIT SPEED (rev/min)                :   RPML
* ENTER AMOUNT OF INTERVAL OF ENGINE SPEED (TIMES)        :   RPMN
* ENTER AMBIENT PRESSURE (In.Hg)                          :   DHH
* ENTER LOWER MANIFOLD PRESSURE LIMIT (In.Hg)             :   DHL
* ENTER AMOUNT OF INTERVAL OF MANIFOLD PRESSURE (TIMES)   :   M
```

โดยข้อมูลเริ่มแรกที่ป้อนเข้าโปรแกรม Engine มีรายละเอียดดังนี้

N คือ จำนวนช่วงในการเปลี่ยนแปลงตัวแปร ซึ่งค่าที่ป้อนเข้า program มีผลต่อเวลาในการคำนวณ โดยค่า N ที่มากจะได้ข้อมูลที่ละเอียดแต่เวลาในการประมวลผลจะใช้เวลาในการคำนวณนาน ซึ่งค่า N ที่เสนอแนะไม่ควรป้อนค่าเกิน 100

RPMH คือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์สูงสุด มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที โดยค่าที่ป้อนเข้า program มีค่าอยู่ระหว่าง 5000-7000 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นความเร็วรอบสูงสุดของเครื่องยนต์เบนซินทั่วๆไปที่สามารถทำได้

RPML คือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่ำสุด มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที โดยค่าที่ป้อนเข้า program มีค่าอยู่ระหว่าง 600-1000 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นความเร็วรอบเดินเบาของเครื่องยนต์เบนซินทั่วๆไปที่สามารถทำได้

RPMN คือ จำนวนช่วงในการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ ซึ่งค่าที่ป้อนเข้า program มีผลกับเวลาในการคำนวณเช่นเดียวกับค่า N

DHH คือ ความดันบรรยากาศ มีหน่วยเป็น นิ้วปรอท

DHL คือ ความดัน manifold pressure ที่ idle speed หน่วยเป็น นิ้วปรอท ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 8-12 นิ้วปรอทของเครื่องยนต์เบนซินทั่วๆไป

M คือ จำนวนช่วงในการเปลี่ยนแปลงค่าความดัน manifold pressure ผลเช่นเดียวกับค่า N

โดยตัวอย่างข้อมูลเบื้องต้นที่ป้อนเข้าโปรแกรม Engine แสดงได้ดังต่อไปนี้

```
AMOUNT OF INTERVAL OF PARAMETERS          :   5     (TIMES)
ENGINE UPPER LIMIT SPEED                  :   5000  (rev/min)
ENGINE LOWER LIMIT SPEED                  :   1000  (rev/min)
AMOUNT OF INTERVAL OF ENGINE SPEED        :   5     (TIMES)
AMBIENT PRESSURE                          :   30    (In.Hg)
LOWER MANIFOLD PRESSURE LIMIT             :   10    (In.Hg)
AMOUNT OF INTERVAL OF MANIFOLD PRESSURE   :   5     (TIMES)
```

B) ขั้นที่สอง ตรวจสอบความเร็วสูงสุดที่ใช้ไม่ให้เกินค่าความเร็วสูงที่กำหนดไว้ในเงื่อนไขของแต่ละองค์ประกอบ ถ้าไม่มีการกำหนดไว้จะถือความเร็วสูงสุดที่ป้อนเข้าเบื้องต้นเป็นค่าความเร็วสูงสุดในการคำนวณ เมื่อผ่านการตรวจความเร็วรอบแล้วจะเป็นการคำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆในแต่ละองค์ประกอบซึ่งประกอบแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

4.2.1 คำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในส่วนของเครื่องยนต์

4.2.2 คำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในส่วนของฮานยนต์

4.3.1 คำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในส่วนของเครื่องยนต์

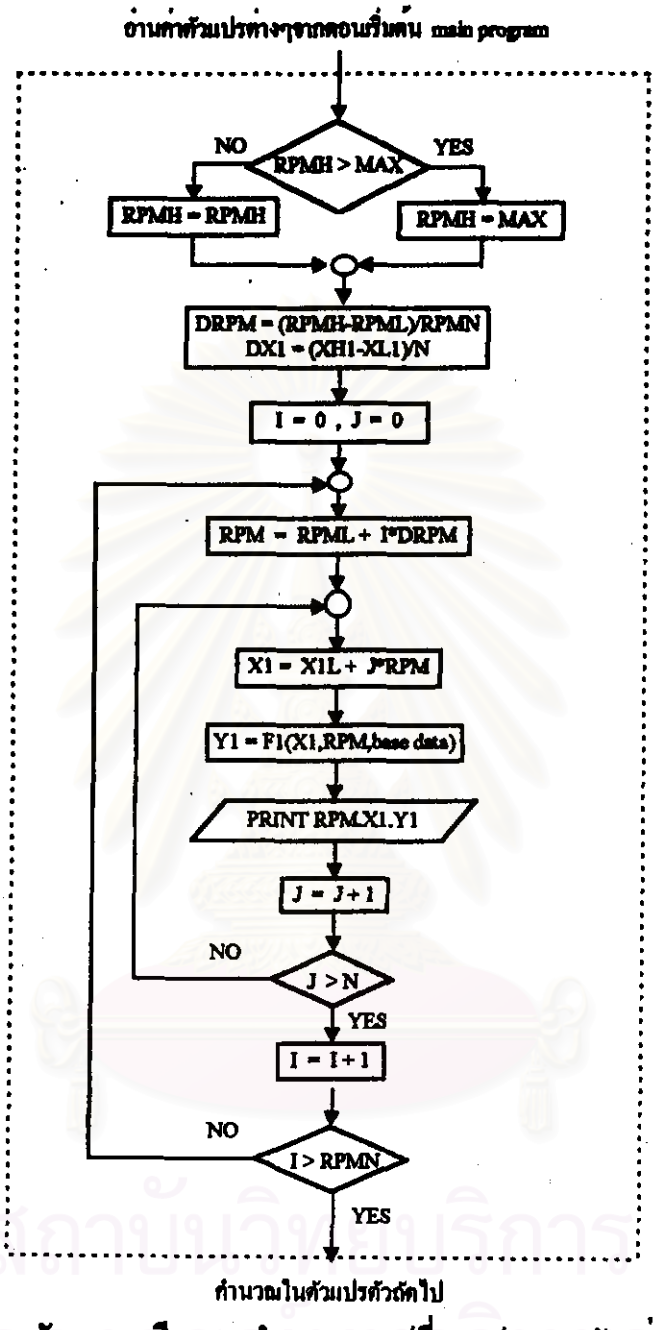
การคำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ในแต่ละองค์ประกอบกำลังงานสูญเสียซึ่งประกอบไปด้วยรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3.1ก) คำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในองค์ประกอบกำลังงานสูญเสียจาก Connecting rod ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ กับกำลังงานสูญเสียได้ดังนี้

$$P1 = F_1(\mu, K_{[illegible]}, C_{[illegible]}, R_{small}, L_{small}, C_{small}, a, l, n_{cyl}, N)$$

แผนภูมิการคำนวณในองค์ประกอบกำลังงานสูญเสียจาก connecting rod สามารถแสดงรายละเอียดของขั้นตอนการคำนวณกำลังงานสูญเสียจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่พิจารณาและ ความเร็วรอบ แสดงได้ดังแผนภูมิต่อไปนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 4.3 แสดงแผงผังรายละเอียดการคำนวณการเปลี่ยนแปลงจากตัวอย่างตัวแปรที่พิจารณา

โดยตัวอย่างตัวแปรที่พิจารณาคือความหนืดน้ำมันหล่อลื่น , μ = X1 และ XH1,XL1 อ่านค่าได้จากแฟ้ม Base.dat และแสดงผล ออกที่แฟ้มข้อมูล result2.out ซึ่งแผนผังการคำนวณนี้ จะใช้คำนวณการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่อกำลังงานสูญเสียจาก piston , connecting rod bearing , crankshaft bearing , cam system และ accessories load ตามลำดับ

จากตัวแปรความหนืดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้เป็นตัวอย่างในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่อกำลังงานสูญเสีย มาแสดงรายละเอียด โดยเริ่มต้นการคำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรความหนืดต่อกำลังงานสูญเสีย ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรทีละตัวแปร สำหรับตัวแปรที่เหลือจะถูกกำหนดเป็นค่าตาม baseline engine data และจะคำนวณผลการเปลี่ยนแปลงที่ความเร็วรอบต่างๆ ตามข้อมูลที่ป้อนเข้ามาโปรแกรมในขั้นตอนแรก

สำหรับช่วงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรการออกแบบและความเร็วรอบเครื่องยนต์สามารถแสดงตัวอย่างได้ดังนี้

จากตัวอย่างข้อมูลที่ป้อนเข้าเบื้องต้นประกอบด้วยดังต่อไปนี้

N = 5 , RPMH = 5000 , RPML = 1000 , RPMN = 5 , DHH = 30 , DHL = 10 , M = 10

จะได้ว่าช่วงการเพิ่มของความเร็วรอบคือ (RPMH-RPML)/RPMN จะเท่ากับ 800 ฉะนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเป็น 1000 , 1800 , 2600 , 3400 , 4200 , 5000 ตามลำดับ

และช่วงการเพิ่มของความดัน manifold pressure เท่ากับ (DHH-DHL)/M จะเท่ากับ 4 ฉะนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความดัน manifold pressure เป็น 10 , 14 , 18 , 22 , 26 , 30 ตามลำดับ

สำหรับตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงตัวแปรความหนืดน้ำมันหล่อลื่น , μ ที่มีผลต่อกำลังงานสูญเสียจาก connecting rod bearing สามารถคำนวณช่วงการเปลี่ยนแปลงตัวได้ดังนี้

จากขอบเขตสูงสุดและต่ำสุดของตัวแปรความหนืดน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากแฟ้มข้อมูล base.dat คือ 0.012-0.015 Pa.s สามารถดูรายละเอียดจากภาคผนวก ค. ฉะนั้นช่วงการเพิ่มของตัวแปร μ เท่ากับ (0.015-0.012)/N = 0.0006 จะได้ค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรμ เป็นดังนี้ 0.012 , 0.0126 , 0.0132 , 0.0138 , 0.0144 , 0.015 ตามลำดับ โดยตัวอย่างผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงตัวแปรความหนืดน้ำมันหล่อลื่นต่อองค์ประกอบการสูญเสียจาก connecting rod bearing จากโปรแกรม Engine สามารถแสดงได้ดังนี้

```
POWER LOSS FROM CONNECTING ROD BEARING
  * POWER LOSS VARY WITH ABSOLUTE VISCOSITY
  ABSOLUTE VISCOSITY (Pa.s) & POWER LOSS (W)

(SPEED,rev/min) (VISCOSITY,Pa.s) (POWER LOSS,W)
   1000.00          .012000          149.09
   1000.00          .012600          156.55
   1000.00          .013200          164.00
   1000.00          .013800          171.46
   1000.00          .014400          178.91
   1000.00          .015000          186.37
```

(SPEED,rev/min)	(VISCOSITY,Pa.s)	(POWER LOSS,W)
1800.00	.012000	483.07
1800.00	.012600	507.22
1800.00	.013200	531.37
1800.00	.013800	555.53
1800.00	.014400	579.68
1800.00	.015000	603.83

(SPEED,rev/min)	(VISCOSITY,Pa.s)	(POWER LOSS,W)
2600.00	.012000	1007.88
2600.00	.012600	1058.27
2600.00	.013200	1108.67
2600.00	.013800	1159.06
2600.00	.014400	1209.46
2600.00	.015000	1259.85

(SPEED,rev/min)	(VISCOSITY,Pa.s)	(POWER LOSS,W)
3400.00	.012000	1723.53
3400.00	.012600	1809.71
3400.00	.013200	1895.89
3400.00	.013800	1982.06
3400.00	.014400	2068.24
3400.00	.015000	2154.42

(SPEED,rev/min)	(VISCOSITY,Pa.s)	(POWER LOSS,W)
4200.00	.012000	2630.03
4200.00	.012600	2761.53
4200.00	.013200	2893.03
4200.00	.013800	3024.53
4200.00	.014400	3156.03
4200.00	.015000	3287.54

(SPEED,rev/min)	(VISCOSITY,Pa.s)	(POWER LOSS,W)
5000.00	.012000	3727.36
5000.00	.012600	3913.73
5000.00	.013200	4100.10
5000.00	.013800	4286.47
5000.00	.014400	4472.84
5000.00	.015000	4659.21

สำหรับค่ากำลังงานสูญเสียจากข้อมูลด้านบนที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงตัวแปร μ โดยตัวแปรที่เหลือจะถูกกำหนดให้คงที่ตามข้อมูล baseline engine data และคำนวณผลต่อไปเรื่อยจนครบทุกตัวแปร เมื่อกำหนดครบทุกตัวแปรแล้ว จึงคำนวณการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในองค์ประกอบถัดไป โดยข้อมูลที่คำนวณได้จะเก็บไว้ที่แฟ้มข้อมูล result2.out

4.3.1ข) คำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่อองค์ประกอบกำลังงานสูญเสียจาก Crank shaft bearing ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียกับตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้

$$P2 = F_2(\mu, R_{crank}, L_{crank}, C_{crank}, n_b, N)$$

4.3.1ค1) คำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่อองค์ประกอบกำลังงานสูญเสียจาก Piston skirt ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียกับตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้

$$P3 = F_3(\mu, B, L_{skirt}, C_p, a, n_{cyl}, N)$$

4.3.1ค2) คำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่อองค์ประกอบกำลังงานสูญเสียจาก Piston ring ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียกับตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้

$$P4 = F_4(\mu, B, b'_{pins}, b'_{oil}, a, n_{pins}, n_{oil}, n_{cyl}, N)$$

4.3.1ง) คำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่อองค์ประกอบกำลังงานสูญเสียจาก Cam system ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียกับตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้

$$P5 = F_5(K, L_{lift}, R, r, P_{pl}, m, N)$$

4.3.1จ) คำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่อองค์ประกอบกำลังงานสูญเสียจากภาระในการขับ Compressor ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียกับตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้

$$P6 = F_6(\text{Cooling load}, N)$$

4.3.1ฉ) คำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่อองค์ประกอบกำลังงานสูญเสียจากภาระในการขับ Alternator ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียกับตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้

$$P7 = F_7(D_a, L_a, N)$$

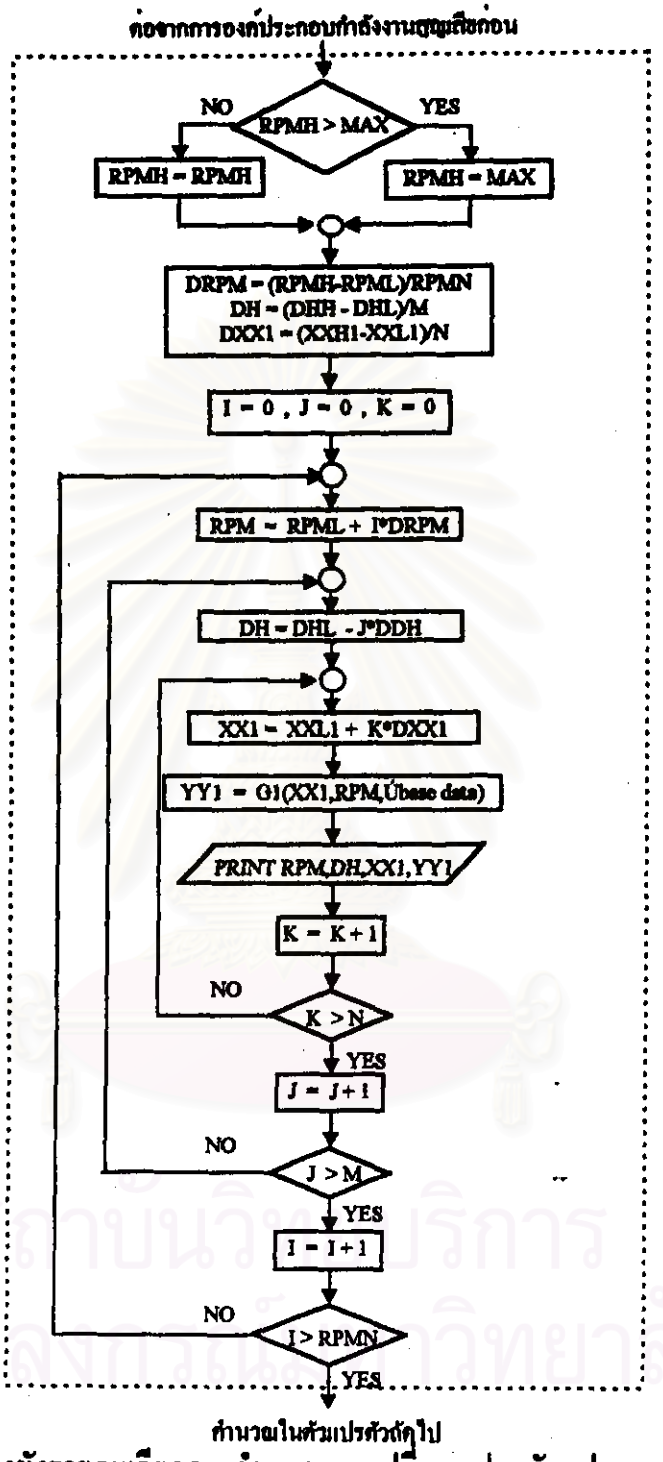
4.3.1ช) คำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่อองค์ประกอบกำลังงานสูญเสียจากภาระในการขับ Cooling water , Oil pump and miscellaneous ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียกับตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้

$$P8 = F_8(N)$$

4.3.1ซ) คำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่อองค์ประกอบกำลังงานสูญเสียจาก Pumping losses ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียกับตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้

$$P9 = F_9(R_o, D_{iv}, \Delta h, N)$$

แผนภูมิการคำนวณในองค์ประกอบกำลังงานสูญเสียจาก pumping losses สามารถแสดงรายละเอียดของขั้นตอนการคำนวณผลการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่พิจารณา ความเร็วรอบ และ manifold pressure แสดงได้ดังต่อไปนี้



รูป 4.4 แสดงแผนผังรายละเอียดการคำนวณการเปลี่ยนแปลงตัวแปรจาก pumping losses

โดยตัวแปรที่พิจารณาคือ R_o = XX1 และ XXH1,XXL1 อ่านค่าได้จากแฟ้ม Base.dat และเก็บผลการคำนวณที่แฟ้มข้อมูล result2.out

4.3.2 คำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในส่วนของยานยนต์

สำหรับการคำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในส่วนของยานยนต์ ก็มีลักษณะเช่นเดียวกับในส่วนของเครื่องยนต์

4.3.2ก) คำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่อกำลังงานสูญเสียจาก Air resistance ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียกับตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้

$$P10 = F_{10}(C_d, A_f, G_T, N)$$

4.3.2ข) คำนวณผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่อองค์ประกอบกำลังงานสูญเสียจาก Rolling resistance สามารถแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียกับตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้

$$P11 = F_{11}(f, m_v, G_T, N)$$

สำหรับรายละเอียดของตัวโปรแกรม Engine แสดงไว้ในภาคผนวก จ

4.4 ขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม Optimum

โปรแกรม Optimum เป็นโปรแกรม สำหรับการคำนวณหาค่าเหมาะสม(optimum) ของตัวแปรที่ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียต่ำที่สุดในช่วงของตัวแปรที่ต้องการที่จะพิจารณาซึ่งในที่นี้จะเรียกว่าข้อมูล optimum data และแสดงผลจากการเปรียบเทียบของกำลังงานสูญเสียจากข้อมูล baseline engine data กับข้อมูล optimum data ที่คำนวณหาได้มาจากขั้นตอนก่อนทั้งในส่วนของเครื่องยนต์และยานยนต์ และแสดงผลของสัดส่วนของกำลังงานสูญเสียต่างๆ ในเครื่องยนต์ และแสดงผลของกำลังงานสูญเสียที่ลดลงได้จากตัวแปรที่มีค่าเหมาะสม (optimum) ทั้งในส่วนของเครื่องยนต์และยานยนต์

ตัวแปรที่ต้องการพิจารณาหาค่าที่เหมาะสมนั้น จะแบ่งเป็นกลุ่มในการคำนวณซึ่งพิจารณาได้จากสมการความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียในส่วนของเครื่องยนต์และยานยนต์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก) สมการความสัมพันธ์กำลังงานสูญเสียกับตัวแปรต่างๆ จาก Connecting rod คือ

$$P1 = F_1(\mu, R_{big}, L_{big}, C_{big}, R_{small}, L_{small}, C_{small}, a, l, n_{cyl}, N)$$

ข) สมการความสัมพันธ์กำลังงานสูญเสียกับตัวแปรต่างๆจาก Crank shaft bearing คือ

$$P2 = F_2(\mu, R_{crank}, L_{crank}, C_{crank}, n_b, N)$$

ค) สมการความสัมพันธ์กำลังงานสูญเสียกับตัวแปรต่างๆ จาก Piston skirt คือ

$$P3 = F_3(\mu, B, L_{skirt}, C_p, a, n_{cyl}, N)$$

ง) สมการความสัมพันธ์กำลังงานสูญเสียกับตัวแปรต่างๆ จาก Piston ring คือ

$$P4 = F_4(\mu, B, b'_{pcon}, b'_{oil}, a, n_{pcon}, n_{oil}, n_{cyl}, N)$$

จ) สมการความสัมพันธ์กำลังงานสูญเสียกับตัวแปรต่างๆ จาก Cam system คือ

$$P5 = F_5(K, L_{skin}, R, r, P_{pl}, m, N)$$

ฉ) สมการความสัมพันธ์กำลังงานสูญเสียกับตัวแปรต่างๆ จากภาระในการขับ Compressor คือ

$$P6 = F_6(\text{Cooling load}, N)$$

ช) สมการความสัมพันธ์กำลังงานสูญเสียกับตัวแปรต่างๆ จากภาระในการขับ Alternator คือ

$$P7 = F_7(D_a, L_a, N)$$

ซ) สมการความสัมพันธ์กำลังงานสูญเสียกับตัวแปรต่างๆ จาก Pumping losses คือ

$$P9 = F_9(R_c, D_{iv}, \Delta h, N)$$

ฌ) สมการความสัมพันธ์กำลังงานสูญเสียกับตัวแปรต่างๆ จาก Air resistance คือ

$$P10 = F_{10}(C_d, A_f, G_T, N)$$

ญ) สมการความสัมพันธ์กำลังงานสูญเสียกับตัวแปรต่างๆ จาก Rolling resistance คือ

$$P11 = F_{11}(f, m_v, G_T, N)$$

จากสมการความสัมพันธ์ทางด้านบนเราสามารถแจกแจงตัวแปรต่างๆ เป็นกลุ่มของตัวแปรได้ 3 กลุ่มคือ

A) กลุ่มตัวแปรกลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มตัวแปรที่มีผลต่อองค์ประกอบกำลังงานสูญเสียในเครื่องยนต์เพียงองค์ประกอบเดียว โดยไม่มีผลต่อองค์ประกอบกำลังงานสูญเสียอื่นๆ ซึ่งตัวแปรต่างๆในกลุ่มนี้ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

- R_{crank} รัศมีแบริ่งของ crankshaft bearing , m
- L_{crank} ความกว้างของ crankshaft bearing , m
- C_{crank} ระยะช่องว่างแนวรัศมีแบริ่ง ใน crankshaft bearing , mm
- D_a เส้นผ่าศูนย์กลางของ rotor ใน alternator , m
- L_a ความยาวของ rotor ใน alternator , m
- L_{skirt} ระยะความยาวของพื้นที่ด้านข้างกระบอกสูบ , m
- b'_{pcon} ระยะหน้ากว้างแหวนอัดใน piston , mm
- b'_{oil} ระยะหน้ากว้างแหวนน้ำมันใน piston , mm
- R_{big} รัศมีแบริ่งใน connecting rod big-end side , m

- L_{cbig} ระยะความกว้างแบริ่งใน connecting rod big-end side , m
- C_{cbig} ระยะช่องว่างแนวรัศมีแบริ่งใน connecting rod big-end side , mm
- R_{csmall} รัศมีแบริ่งใน connecting rod small-end side , m
- L_{csmall} ระยะความกว้างแบริ่งใน connecting rod small-end side , m
- C_{csmall} ระยะช่องว่างแนวรัศมีแบริ่งใน connecting rod small-end side , mm
- k ค่าคงที่ของ สปริง , N/m
- L_{vm} ระยะยกตัวของวาล์ว , mm
- R รัศมีฐานของแคม , mm
- r รัศมียอดของแคม , mm
- P_{pl} แรงกดเริ่มต้นของสปริง , N
- m_f มวลของวาล์วตัวตาม , kg
- D_{in} ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวาล์วไอดี , mm
- Cooling load ภาระทางความร้อนที่เกิดในห้องผู้โดยสาร , W

B) กลุ่มตัวแปรกลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มตัวแปรที่มีผลต่อองค์ประกอบกำลังงานสูญเสียในเครื่องยนต์หลายองค์ประกอบ โดยมีผลต่อองค์ประกอบกำลังงานสูญเสียอื่นๆมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบกำลังงานสูญเสีย ซึ่งตัวแปรต่างๆในกลุ่มนี้ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

- μ ความหนืดสัมบูรณ์ของน้ำมันหล่อลื่น , Pa•s
- B ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางในกระบอกสูบ , m
- a รัศมีของเพลาข้อเหวี่ยง , m

จากตัวแปรทั้งสามตัวข้างต้นพบว่า ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางในกระบอกสูบกับ รัศมีของเพลาข้อเหวี่ยงนั้นมีความสัมพันธ์กันในรูปของปริมาตรกระบอกสูบดังต่อไปนี้

$$a = 2\frac{V_d}{\pi B^2 n_{cyl}}$$

ซึ่งจะทำให้ตัวแปรในกลุ่มที่สองลดตัวแปรลง โดยแสดงได้ดังนี้

- μ ความหนืดสัมบูรณ์ของน้ำมันหล่อลื่น
- B ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางในกระบอกสูบ

สำหรับสมการที่ใช้ในการเปรียบเทียบกำลังงานสูญเสียที่ต่ำสุดนั้นจะได้ว่า

$$y = F_1(\mu, R_{big}, L_{big}, C_{big}, R_{small}, L_{small}, C_{small}, a, l, n_{cyl}, N) + F_2(\mu, R_{crank}, L_{crank}, C_{crank}, n_b, N)$$

$$+ F_3(\mu, B, L_{skirt}, C_p, a, n_{cyl}, N) + F_4(\mu, B, b'_{pass}, b'_{oil}, a, n_{pass}, n_{oil}, n_{cyl}, N)$$

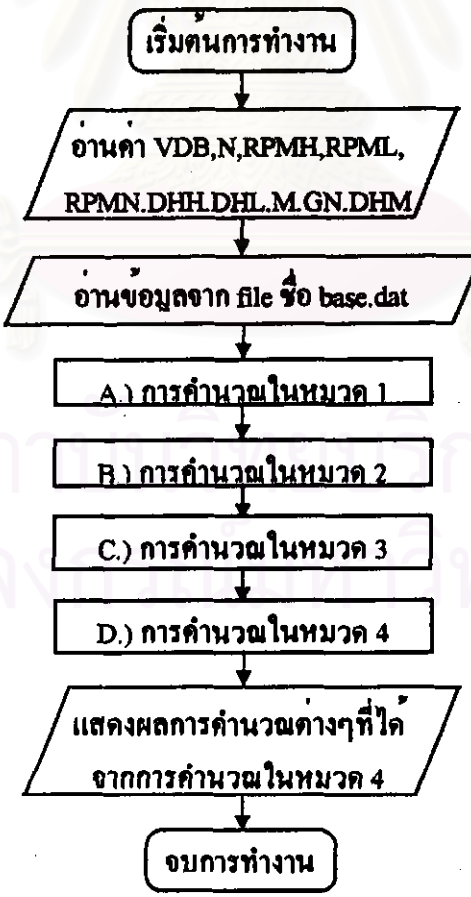
$$y = G_2(\mu, B, a, l, R_{crank}, L_{crank}, C_{crank}, L_{skirt}, b'_{pass}, b'_{oil}, R_{big}, L_{big}, C_{big}, R_{small}, L_{small}, C_{small}, n_{cyl}, n_b, n_{pass}, n_{oil}, N)$$

C) กลุ่มตัวแปรกลุ่มที่ 3 เป็นกลุ่มตัวแปรที่มีผลต่อองค์ประกอบกำลังงานสูญเสียเพียงองค์ประกอบเดียวในส่วนของยานยนต์ โดยไม่มีผลต่อองค์ประกอบกำลังงานสูญเสียอื่นๆ ซึ่งตัวแปรต่างๆในกลุ่มนี้ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

- C_d drag coefficient
- A_f frontal area , m^2
- f rolling coefficient
- m_v vehicle mass , kg

โดยรายละเอียดของโปรแกรม Optimum แสดงไว้ในภาคผนวก ฉ

สำหรับขั้นตอนการคำนวณหลักสามารถแสดงได้จากแผนภูมิดังต่อไปนี้



รูป 4.5 แสดงแผนผังการคำนวณหลักของโปรแกรม Optimum

ขั้นตอนในการคำนวณของโปรแกรม Optimum มีรายละเอียดดังนี้

A) ขั้นที่หนึ่ง ใส่ข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการคำนวณซึ่งแสดงได้ดังนี้

```
* ENTER ENGINE DISPLACEMENT VOLUME (CC)                    :  VDB
* ENTER AMOUNT OF INTERVAL OF PARAMETERS (TIMES)            :  N
* ENTER ENGINE UPPER LIMIT SPEED (rev/mim)                  :  RPMH
* ENTER ENGINE LOWER LIMIT SPEED (rev/min)                  :  RPML
* ENTER AMOUNT OF INTERVAL OF ENGINE SPEED (TIMES)          :  RPMN
* ENTER AMBIENT PRESSURE (In.Hg)                            :  DHH
* ENTER LOWER MANIFOLD PRESSURE LIMIT (In.Hg)               :  DHL
* ENTER AMOUNT OF INTERVAL OF MANIFOLD PRESSURE (TIMES)     :  M
* ENTER OPERATION ENGINE SPEED (rev/min)                    :  ORPM
* ENTER MANIFOLD PRESSURE TO COMPARE (In.Hg)                :  DHM
```

โดยข้อมูลเริ่มแรกที่ป้อนเข้าโปรแกรม Engine มีรายละเอียดดังนี้

VDB คือ ปริมาตรกระบอกสูบ , ลูกบาศก์เซ็นติเมตร

N คือ จำนวนช่วงในการเปลี่ยนแปลงตัวแปร

RPMH คือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์สูงสุด , รอบต่อนาที

RPML คือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่ำสุด , รอบต่อนาที

RPMN คือ จำนวนช่วงในการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ

DHH คือ ความดันบรรยากาศ , นิ้วปรอท

DHL คือ ความดัน manifold pressure ที่ต่ำที่สุด , นิ้วปรอท

M คือ จำนวนช่วงในการเปลี่ยนแปลงค่าความดัน manifold pressure

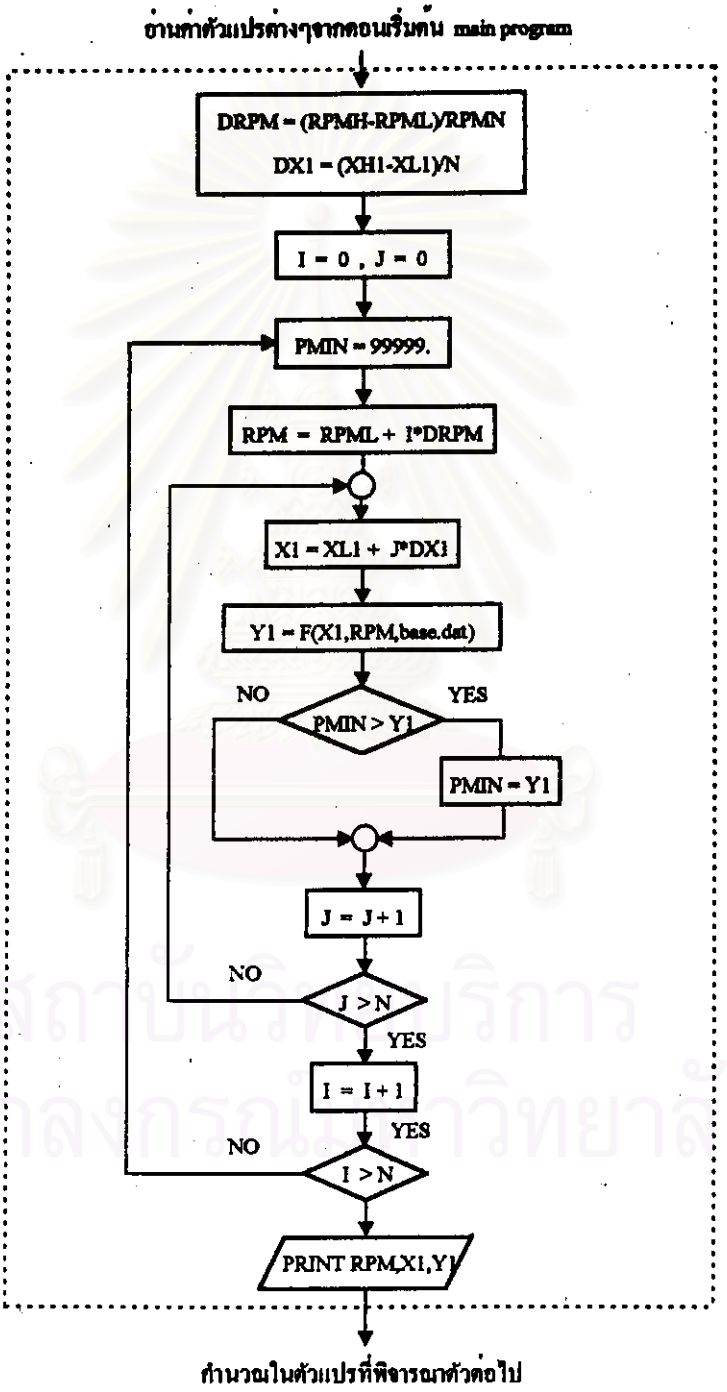
ORPM คือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่พิจารณา , รอบต่อนาที

DHM คือ ความดัน manifold pressure ที่พิจารณา , นิ้วปรอท

B) ขั้นที่สอง คำนวณหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมและประเมินผลต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 4 หมวด ดังต่อไปนี้

หมวดที่1 เป็นส่วนการคำนวณหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่ทำให้กำลังงานสูญเสียมีค่าต่ำที่สุดโดยวิธี direct search โดยการเปรียบเทียบหาค่ากำลังงานสูญเสียที่ต่ำที่สุดโดยตรง จากตัวแปรในช่วงที่พิจารณา จากแฟ้มข้อมูล base.dat ที่ทุกความเร็วรอบที่พิจารณา โดยกลุ่มตัวแปรที่พิจารณาคือกลุ่มที่ 1 ซึ่งเป็นกลุ่มตัวแปรที่ไม่ร่วมสมการกำลังงานสูญเสียในส่วนของเครื่องยนต์ จะคำนวณเช่นนี้เพื่อหาตัวแปรที่ทำให้กำลังงานสูญเสียที่ต่ำสุดในช่วงตัวแปรที่พิจารณาจนครบทุกตัวแปรในกลุ่มที่ 1 ซึ่งข้อมูลที่คำนวณได้จะถูกเก็บไว้ที่ แฟ้มข้อมูล result3.out

แผนภูมิการคำนวณในหมวด 1 แสดงรายละเอียดของขั้นตอนการคำนวณค่าตัวแปรไม่ร่วมสมการจากส่วนของเครื่องยนต์ที่ให้กำลังงานสูญเสียต่ำสุดจากช่วงตัวแปรที่พิจารณา เช่น กำหนดตัวแปรที่พิจารณาคือ R_{mn} = X1 และ XH1,XL1 ซึ่งได้จากแฟ้มข้อมูล Base.dat สามารถแสดงได้ดังแผนภูมิต่อไปนี้



รูป 4.6 แสดงแผงผังรายละเอียดตัวอย่างการคำนวณตัวแปรที่เหมาะสมในหมวด 1

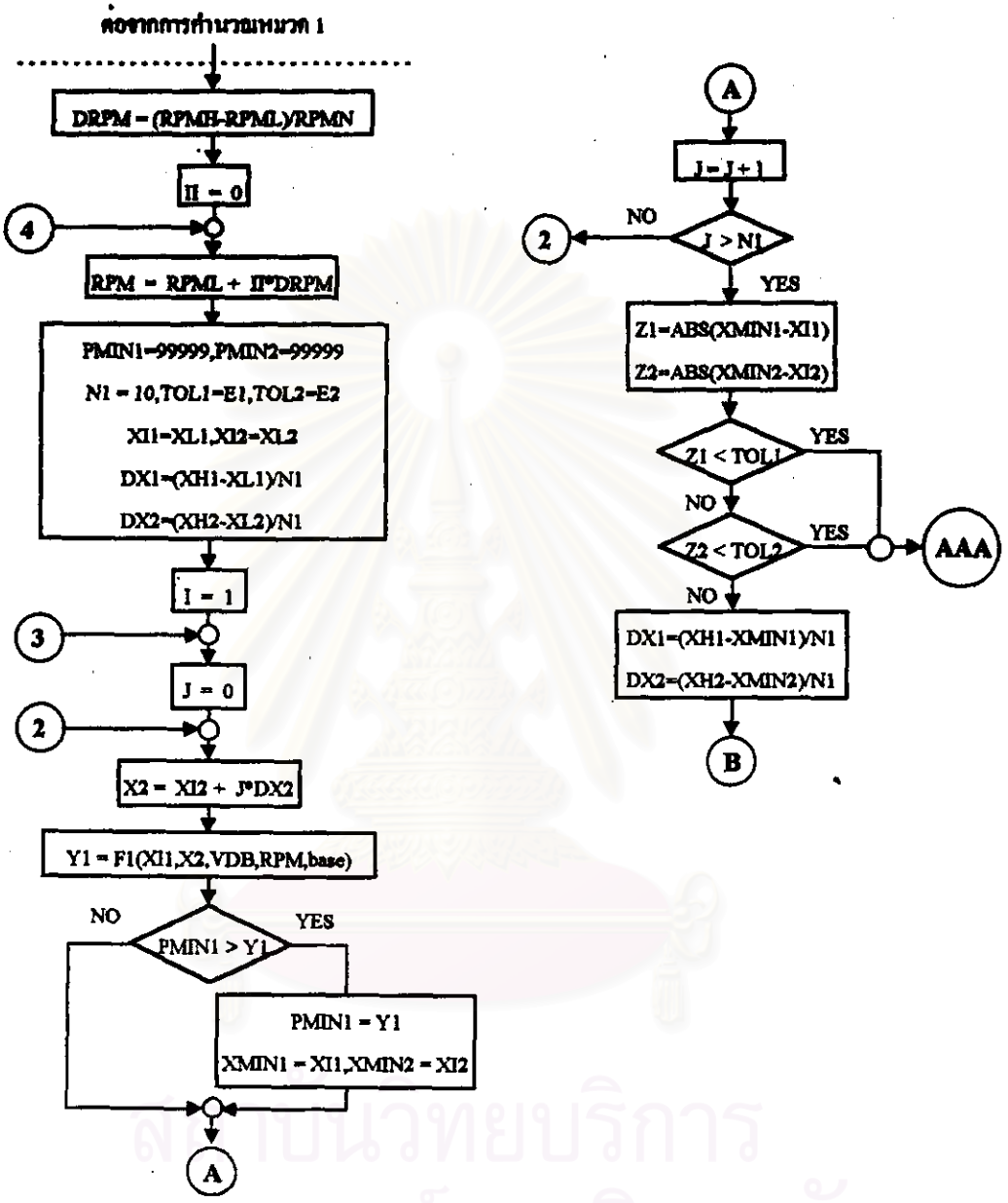
ตัวอย่างเช่น ข้อมูลที่ป้อนเข้าโปรแกรมเริ่มแรก มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

N = 5 , RPMH = 5000 , RPML = 1000 , RPMN = 5 , DHH = 30 , DHL = 10 , M = 10 , ORPM = 2600 , DHM = 12.6 ทำให้ได้ว่า

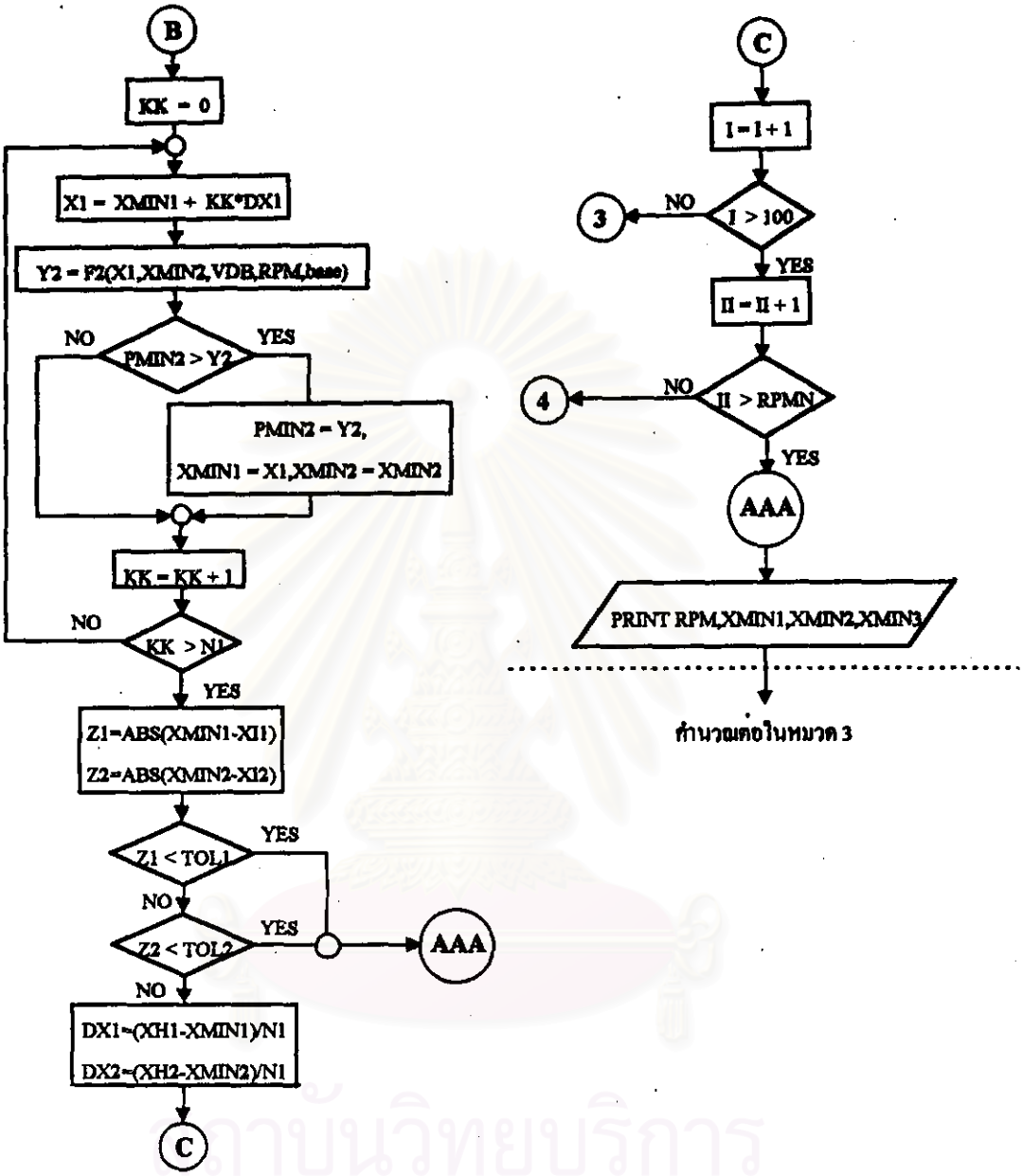
ช่วงการเพิ่มของความเร็วรอบในแต่ละครั้ง จะเท่ากับ (5000-1000)/5 = 800 รอบต่อนาที ฉะนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเป็น 1000 , 1800 , 2600 , 3400 , 4200 , 5000 รอบต่อนาที สำหรับช่วงการเพิ่มของความดัน manifold pressure ในแต่ละครั้งจะเท่ากับ (30-10)/5 = 4 นิ้วปรอท ทำให้การเปลี่ยนแปลง ความดัน manifold pressure เป็น 10 , 14 , 18 , 22 , 26 , 30 นิ้วปรอท

ตัวอย่างการคำนวณหาตัวแปรที่ทำให้กำลังงานสูญเสียต่ำสุด ยกตัวอย่างเช่นตัวแปร R_{cm} โดยการเปลี่ยนในช่วงตัวแปรตามข้อมูลจากแฟ้ม base.dat และช่วงการเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 0.0225-0.0275 m จะได้ว่าช่วงการเพิ่มของตัวแปร R_{cm} ในแต่ละครั้งจะเท่ากับ (0.0275-0.0225)/5 = 0.001 m ฉะนั้นจะคำนวณหาค่าของ R_{cm} ที่ทำให้กำลังงานสูญเสียมีค่าต่ำสุดจากวิธี direct search จากกลุ่มข้อมูลที่มีค่า 0.0225 , 0.0235 , 0.0245 , 0.0255 , 0.0265 , 0.0275 m. และ ที่ความเร็วรอบที่ 1000 , 1800 , 2600 , 3400 , 4200 , 5000 รอบต่อนาที

หมวดที่ 2 เป็นส่วนการคำนวณหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่ทำให้กำลังงานสูญเสียมีค่าต่ำที่สุดโดยวิธี univariable search จากกลุ่มตัวแปรกลุ่มที่ 2 ซึ่งเป็นกลุ่มตัวแปรที่รวมสมการกำลังงานสูญเสียจากเครื่องยนต์ โดยข้อมูลที่คำนวณได้จะถูกเก็บไว้ที่ แฟ้มข้อมูล result3.out แผนภูมิการคำนวณในหมวด 2 แสดงรายละเอียดของขั้นตอนการค่าตัวแปรร่วมสมการกำลังงานสูญเสียจากส่วนของเครื่องยนต์ที่ให้กำลังงานสูญเสียต่ำสุดจากช่วงตัวแปรที่พิจารณา เช่น กำหนดตัวแปรที่พิจารณาคือ μ = X1 , B = X2 , และ XH1,XL1,XH2,XL2, ได้จากแฟ้ม Base.dat สามารถแสดงได้ดังแผนภูมิต่อไปนี้



รูป 4.7 แสดงแผงผังรายละเอียดตัวอย่างการคำนวณตัวแปรที่เหมาะสมในหมวด 2



รูป 4.7 ต่อ แสดงแผงผังรายละเอียดตัวอย่างการคำนวณตัวแปรที่เหมาะสมในหมวด 2

หมวดที่3 เป็นส่วนการคำนวณหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่ทำให้กำลังงานสูญเสียมีค่าต่ำที่สุดโดยวิธี direct search โดยการเปรียบเทียบหาค่ากำลังงานสูญเสียที่ต่ำที่สุดโดยตรง จากตัวแปรในช่วงที่พิจารณา จากแฟ้มข้อมูล base.dat ที่ทุกความเร็วรอบที่พิจารณา โดยกลุ่มตัวแปรที่พิจารณาคือกลุ่มที่ 3 ซึ่งเป็นกลุ่มตัวแปรที่ไม่ร่วมสมการกำลังงานสูญเสียจากยานยนต์ จะคำนวณเช่นนี้เพื่อหาตัวแปรที่ทำให้กำลังงานสูญเสียที่ต่ำสุดในช่วงตัวแปรที่พิจารณาจนครบทุกตัวแปรในกลุ่มที่3 โดยข้อมูลที่คำนวณได้จะถูกเก็บไว้ที่ แฟ้มข้อมูล result3.out

สำหรับรายละเอียดการคำนวณในหมวด 3 นั้นมีรายละเอียดเช่นเดียวกับ หมวด 1 โดยคำนวณหาตัวแปรที่ผลต่อกำลังงานสูญเสียที่ต่ำที่สุด ซึ่งเป็นตัวแปรการออกแบบในส่วนของยานยนต์

ตัวอย่างแฟ้มข้อมูล result3.out ที่ได้จากการคำนวณในหมวด 1 ,2 และ 3 ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1000 รอบต่อนาที สามารถแสดงได้ดังนี้

```
ENGINE SPEED : 1000.00  (rev/min) :          1587.0 (CC)

RADIUS OF BEARING IN CRANKSHAFT   :           .02100 (m)
BEARING WIDTH IN CRANKSHAFT       :           .02000 (m)
RADIUS CLEARANCE IN CRANKSHAFT    :          .27E-04 (m)
INLET VALVE DIAMETER              :            .0330 (m)
PISTON CLEARANCE                  :          .000080 (m)
SKIRT LENGTH                      :            .0360 (m)
PRESSURE RING DEPTH               :              3.0 (mm)
OIL RING DEPTH                    :              1.0 (mm)
RADIUS BEARING AT BIG-END SIDE    :           .0210 (m)
RADIUS CLEARANCE AT BIG-END SIDE  :          .38E-04 (m)
BEARING WIDTH AT BIG-END SIDE     :            .020 (m)
RADIUS BEARING AT SMALL-END SIDE  :           .0100 (m)
RADIUS CLEARANCE AT SMALL-END SIDE:          .20E-04 (m)
BEARING WIDTH AT SMALL-END SIDE   :            .020 (m)
VALVE FOLLOWER MASS               :           .1500 (kg)
SPRING STIFFNESS                  :         21600.0 (N/m)
VALVE PRELOAD                     :           140.0 (N)
BASE RADIUS                       :           14.00 (mm)
TIP RADIUS                        :            2.20 (mm)
VALVE LIFT                        :             9.0 (mm)
ABSOLUTE VISCOSITY                :           .0120 (Pa.s)
BORE                              :           .0900 (m)
CRANK ARM                         :          .03118 (m)
DRAG COEFFICIENT                  :             .30
FRONTAL AREA                      :            1.75 (m^2)
ROLLING COEFFICENT                :          .01450
VEHICLE MASS                      :          1000.0 (kg)
COOLING LOAD                      :         2300.00 (W)
ROTOR DIAMETER IN ALTERNATOR      :           .1000 (m)
ROTOR LENGTH IN ALTERNATOR        :           .0900 (m)
```

หมวดที่ 4 เป็นส่วนของการคำนวณผล ซึ่งประกอบด้วยดังต่อไปนี้

ก) เป็นการคำนวณสัดส่วนของกำลังสูญเสียในแต่ละองค์ประกอบเมื่อตัวแปรต่างๆในเครื่องยนต์มีค่าตาม baseline engine data ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข

ข) เป็นการคำนวณผลของกำลังงานสูญเสียในแต่ละองค์ประกอบทั้งในส่วนของเครื่องยนต์และยานยนต์ต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเครื่องยนต์ ตามข้อมูล baseline engine data และข้อมูลตัวแปรที่ได้จากการวิเคราะห์ใน หมวด 1 , 2 และ 3

ค) เป็นการคำนวณผลของการลดลงของกำลังงานสูญเสียที่ได้จากข้อมูลใน หมวด 1 , 2 และ 3 กับ ข้อมูล baseline engine data พร้อมกับแจกแจงสัดส่วนของแต่ละองค์ประกอบที่มีบทบาทต่อกำลังงานสูญเสียที่ลดลงจากการปรับปรุงตัวแปรการออกแบบ

ตัวอย่าง แฟ้มข้อมูล result3.out ที่ได้จากการคำนวณในหมวด 4 แสดงได้ดังนี้

```
 POWER REQUIRED AT BASE LINE DATA
(rev/min) CRANK  COMP.  PUMP  ALTER PUMPING SKIRT  RING  CON-ROD CAM   TOTAL
 1000.0  136.2 1130.9   35.6  619.6 1126.9   52.1  138.9   78.2  208.9 3527.5
 1800.0  441.3 1697.3  154.6  685.4 2033.9  168.8  450.1  253.2  372.2 6257.1
 2600.0  920.8 1697.3  387.8  814.3 2996.0  352.3  939.1  528.3  529.1 9165.1
 3400.0 1574.6 1697.3  758.3    -   4215.2  602.4 1606.0  903.4    -     -
 4200.0 2402.8 1697.3 1286.1    -     -     919.2 2450.6 1378.6    -     -
 5000.0 3405.3 1697.3 1988.7    -     -    1302.8 3473.1 1953.8    -     -

  POWER REQUIRED AT OPTIMUM DATA
(rev/min) CRANK  COMP.  PUMP  ALTER PUMPING SKIRT  RING  CON-ROD CAM   TOTAL
 1000.0   65.0 1130.9   35.5  611.4 1126.5   26.3   77.3   37.3  159.4 3271.7
 1800.0  210.8 1561.5  154.6  649.7 2007.3   85.5  250.4  121.0  283.1 5324.2
 2600.0  439.8 1561.5  387.7  724.6 2892.7  178.4  522.5  252.5  400.3 7360.3
 3400.0  752.1 1561.5  758.3    -   3961.8  305.1  893.6  431.8    -     -
 4200.0 1147.7 1561.5 1286.0    -     -     465.5 1363.5  658.9    -     -
 5000.0 1626.5 1561.5 1988.7    -     -     659.8 1932.5  933.7    -     -

  ROAD LOAD AND TRANSMISSION AT BASE LINE
(rev/min): (km/hr) : AIR-LOAD(W) : ROLLING-LOAD(W) : TRANSMISSION(W)
 1000.0      8.2         4.50          383.09            96.90
 1800.0     24.7       120.66         1146.60           316.81
 2600.0     83.3      4636.47         3869.21           945.08
 3400.0    108.9     10368.22         5059.73          1714.22
 4200.0    134.5     19544.08         6250.26          2866.04
 5000.0    160.2     32974.44         7440.78          4490.58

  ROAD LOAD AND TRANSMISSION AT OPTIMUM DATA
(rev/min): (km/hr) : AIR-LOAD(W) : ROLLING-LOAD(W) : TRANSMISSION(W)
 1000.0      8.2         3.69          325.80            82.37
 1800.0     24.7        98.95          975.14           268.52
 2600.0     83.3      3802.17         3290.60           788.09
 3400.0    108.9      8502.52         4303.10          1422.85
 4200.0    134.5     16027.24         5315.59          2371.43
 5000.0    160.2     27040.89         6328.08          3707.67

 ENGINE POWER SHARING AT BASE LINE DATA
 CRANK% : AIR% : PUMP% : ALT% : PUMPING% : PIS% : RING% : CON% : CAM%
  10.05  18.52   4.23    8.89    32.69     3.84   10.25   5.76   5.77

 ENGINE SPEED  2600.0  (rev/min)
 POWER AT              BASE LINE DATA : OPTIMUM DATA : DECREASING %

 CRANK-SHAFT (W)      :     920.79        439.83          52.23
 AIR CONDITIONING (W) :    1697.35       1561.56           8.00
 ALTERNATOR (W)       :     814.35        724.68          11.01
 PUMPING (W)          :    2996.00       2892.70           3.45
 PISTON SKIRT (W)     :     352.27        178.42          49.35
 PISTON RING (W)      :     939.13        522.56          44.35
 CONNECTING ROD( W)   :     528.31        252.56          52.21
 CAM LOAD (W)         :     529.12        400.31          24.34

  TOTAL ENGINE POWER LOSS AT BASE LINE : OPTIMUM : DECREASING %
 TOTAL                :          9165.13   7360.29      19.69
 VEHICLE SPEED   83.28 (km/hr)
 POWER AT              BASE LINE DATA : OPTIMUM DATA : DECREASING %
 AIR LOAD (W)         :     4636.47       3802.17          17.99
 ROLLINE LOAD (W)     :     3869.21       3290.60          14.95
 BREAK POWER (W)      :     9450.75       8037.85          14.95
  FRACTION OF DECREASING OF ENGINE POWER LOSS
  CRANK : AIR : ALTERNATOR : PUMPING : SKIRT : RING : CON-ROD : CAM
  26.65   7.52     4.97        5.73     9.63    23.08   15.28
```