บทที่ 3

การวิเคราะห์ราคาของวัฏจักรเชื้อเพลิงปรมาณูสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบใช้น้ำธรรมดา โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.1 การเลือกโปรแกรม

จากการศึกษาค้นคว้าและติดต่อผ่านไปยังต่างประเทศ ได้ข้อมูลเอกสารเกี่ยวกับเรื่องนี้เพียง 4 ชุดด้วยกัน ซึ่งในจำนวนนี้ทราบชื่อเพียง 3 ชุด คือ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ GEM CODE, MITCOST-II CODE และ BEST-5 CODE สำหรับอีกชุดหนึ่งไม่ทราบชื่อเพราะชื่อโปรแกรมได้ถูกยึดฆ่าทิ้งหลังจากได้ศึกษาเอกสารดังกล่าวแล้ว ปรากฏว่ามีเพียงโปรแกรม BEST-5 เท่านั้นที่ค่อนข้างพร้อมที่จะใช้งานได้ทันที กล่าวคือ

ก. BEST-5 ขาดโปรแกรมย่อยฟังก์ชั่นไป 3 ตัวคือ IAND, IOR และ ICOMPL ซึ่งฟังก์ชั่นเหล่านี้มีชื่อเรียกว่า บูลีนฟังก์ชั่น (boolean function) ซึ่งปัจจุบันได้ใช้กันทั่วไปในต่างประเทศและในคอมไพเล่อร์ (compiler) บางตัวได้บรรจุฟังก์ชั่นเหล่านี้ไว้แล้ว และคาดว่าจะเป็น intrinsic function มาตรฐานของคอมพิวเตอร์ในไม่ช้านี้ แต่ในประเทศไทยยังไม่ปรากฏชัดว่ามีผู้ใดใช้

ข. MITCOST-II ขาดโปรแกรมย่อยซับรูทีน (Subroutine) ERASE ซึ่งพิจารณาจากโปรแกรมลิสติ้ง (listing) แล้วเข้าใจว่ามีความสำคัญมากพอสมควร แต่นิยามไม่เด่นชัดและเป็นโปรแกรมย่อยที่ใช้เฉพาะปัญหาไม่ได้เป็นโปรแกรมย่อยมาตรฐาน จึงทำให้การเลือกใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ขาดน้ำหนักไป

ค. GEM จากเอกสารที่ได้มาคงได้มาแต่ทฤษฎี การเตรียมข้อมูลและการแสดงผลเท่านั้นแต่ไม่มีโปรแกรมลิสติ้ง ซึ่งเป็นหัวใจของการศึกษาและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ง. โปรแกรมที่ไม่ทราบชื่อ คงมีแต่เพียงทฤษฎีเท่านั้น และเพราะว่าไม่ทราบชื่อจึงเกินความสามารถที่จะศึกษาค้นคว้าต่อไปได้

ดังนั้นจากเอกสารที่ได้มา จึงมีทางเลือกเพียงหนึ่ง คือใช้โปรแกรม BEST-5 CODE ซึ่งได้มาจาก NEA Computer Program library ในการวิเคราะห์ราคาของวัฏจักรเชื้อเพลิงปรมาณูสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบใช้น้ำธรรมดา

3.2 ที่มาและหลักการของโปรแกรมคอมพิวเตอร์เบสท์-5 (BEST-S CODE)

โปรแกรมเบสท์-5 จัดทำขึ้นโดย P.CIVITA และ T.MAZZANTI แห่ง ENEL-CPN กรุงโรม ประเทศอิตาลี โดยโปรแกรมนี้มีชื่อเป็นภาษาอิตาเลียนว่า "PROGRAMMA BEST-5, STRATEGIA OTTIMALE DI CARICAMENTO DEL COMBUSTIBILE NUCLEARE" และมีชื่อเป็นภาษาอังกฤษว่า "BEST-5, A CODE FOR OPTIMIZATION OF NUCLEAR FUEL STRATEGY" ซึ่งปรากฏใน ENEL-CPN INTERNAL TECHNICAL REPORT(1974)

โปรแกรมนี้เขียนเป็นภาษา FORTRAN IV คำนวณโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ UNIVAC 1106-1108 ต่อมาได้ดัดแปลงแก้ไขมาใช้คำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ IBM 370/165 ซึ่งโปรแกรมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นโปรแกรมที่ใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ IBM คือ BEST-5 PROGRAM (REVISION4(- IBM VERSION)

จุดประสงค์ของโปรแกรมนี้เป็นการหาวัฏจักรเชื้อเพลิงที่เหมาะสมเป็นการแก้ปัญหาการออกแบบวัฏจักรเชื้อเพลิงโดยสัมพันธ์กับอัตราดอกเบี้ยและราคาพลังงานทดแทน โดยเลือกหาวิธีการจัดการแท่งเชื้อเพลิงของแกนกลางแรกเริ่มและการเปลี่ยนเชื้อเพลิงที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ภาวะเข้าใกล้ความสมดุลย์ (equilibrium)

สำหรับวิธีการแก้ปัญหาเพื่อให้ได้มาซึ่งการจัดการเชื้อเพลิงที่เหมาะสมที่สุดนั้น ทำได้โดยใช้วิธีไดนามิคโปรแกรมมิง (Dynamic Programming) ของเบลล์มาน (Bellman)

สำหรับข้อจำกัด (restriction) ของปัญหาโปรแกรมนี้ คือ ชนิดความเข้มข้นของเชื้อเพลิงมีได้สูงสุดไม่เกิน 15 ชนิด วิธีการเปลี่ยนเชื้อเพลิงมีได้สูงสุดไม่เกิน 15 วิธี จำนวนวัฏจักรเชื้อเพลิงสูงสุดไม่เกิน 24 วัฏจักร และ 18 วัฏจักรโดยมีวิธีการเปลี่ยนเชื้อเพลิง 7 และ 15 วิธีตามลำดับ และจำนวนการเลือกการจัดการเชื้อเพลิงในแกนกลางแรกสูงสุดไม่เกิน 256 การเลือก

สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ จะต้องมี core storage 65 K words และจานแม่-เหล็กหรือดรัมสำหรับทด storage เครื่องอ่านบัตรและเครื่องพิมพ์

สำหรับเวลาที่ใช้ในการคำนวณ โดยมีการเลือกการจัดการเชื้อเพลิง 25 การเลือกชนิดความเข้มข้นของเชื้อเพลิง 15 ชนิด วิธีการเปลี่ยนเชื้อเพลิง 7 วิธี และวัฏจักรมี 20 วัฏจักรจะใช้เวลาประมาณ 3-5 นาทีสำหรับ UNIVAC 1108

ปัญหาเกี่ยวกับการใช้เชื้อเพลิงปรมาณูอย่างคุ้มค่านั้นมักเกิดขึ้นกับผู้ใช้มากกว่าผู้ออกแบบเครื่องปฏิกรณ์และผู้จัดส่งเชื้อเพลิง ซึ่งปัญหาเหล่านี้ได้แก่ การหาคาบเวลาของวัฏจักรเชื้อเพลิงที่ดีที่สุด หลีกเลี่ยงการหยุดเดินเครื่องในภาวะต้องการพลังงานมาก การยืดอายุการใช้เชื้อเพลิงออกไปในขณะที่ได้ถึงช่วงเวลาที่จะทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิง และการใช้เชื้อเพลิงที่มีความเข้มข้นเหมาะสมเป็นต้น ซึ่งหากสามารถแก้ปัญหาเหล่านี้ได้จะสามารถประหยัดค่าเชื้อเพลิงได้เป็นจำนวนมาก

การจัดการเชื้อเพลิงปรมาณูสามารถแบ่งออกเป็นด้านแผนการ (strategy) และกลวิธี (tactics) ดังนี้

3.2.1 <u>การออกแบบหรือการวางแผนระยะยาว</u> (แผนการ) ได้แก่ ความเข้มข้นของเชื้อเพลิง การออกแบบเชื้อเพลิง การเลือกขนาดของ batch size, การจัดเรียงเชื้อเพลิงในแกนกลาง การออกแบบทางด้านพอยซัน (poison) และการยืดเวลาการใช้งานเชื้อเพลิงที่ได้วางแผนไว้ ซึ่งผู้รับผิดชอบในการนี้ คือ ผู้ออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

3.2.2 <u>การปฏิบัติการหรือการวางแผนระยะสั้น</u> (กลวิธี) ได้แก่ การยืดอายุการใช้งานที่ไม่ได้วางแผนไว้ในระยะยาว การเปลี่ยนเชื้อเพลิงก่อนหรือหลังระยะเวลาที่กำหนดไว้ การลดกำลังการผลิตพลังงาน (power reduction) เพื่อหลีกเลี่ยงการหยุดเครื่องในภาวะมีความต้องการพลังงานมาก ซึ่งผู้รับผิดชอบในเรื่องนี้คือ ผู้ควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

นอกจากนี้ในระยะตลอดอายุของโรงไฟฟ้าปรมาณู เวลาส่วนใหญ่จะไม่เดินเครื่องในภาวะสมดุลย์ (equilibrium) แต่อยู่ในภาวะเข้าใกล้สมดุลย์ (approach equilibrium) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการควบคุมรีแอคติวิตี

โปรแกรมเบสท์-5 ซึ่งได้จัดทำขึ้นเพื่อสนองต่อเงื่อนไขภาวะเข้าใกล้สมดุลย์และการจัดการเชื้อเพลิง โดยใช้วิธีไดนามิคโปรแกรมมิง (Dynamic Programming) ของ เบลล์มาน (Bellman) เพื่อให้ได้ราคาวัฏจักรเชื้อเพลิงที่น้อยที่สุดนั้น ได้กำหนด performance index ในรูปของราคาพลังงานไฟฟ้า (mills/kWhr) สำหรับสภาพ (state) ที่แสดงคุณสมบัตินั้นได้แก่ จำนวนเชื้อเพลิง ความเข้มข้นของเชื้อเพลิงและรีแอคติวิตีของแต่ละโซนในขณะทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิง สำหรับการตัดสินใจในการดำเนินงาน (operating decision) ซึ่งมีผลทำให้ราคาพลังงานน้อยที่สุด ได้แก่ ขนาด batch size ที่จะทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิงและความเข้มข้นของเชื้อเพลิงที่จะเปลี่ยน สำหรับตัวแปรในการดำเนินงาน (operating variable) ได้แก่ ราคาพลังงานไฟฟ้าตลอดอายุของโรงไฟฟ้า โดยเทียบเท่ากับค่าเงินปัจจุบัน เป็นต้น ซึ่งการคำนวณและเลือกการจัดการเชื้อเพลิงนั้นสลับซับซ้อนมาก แต่ก็สามารถแก้โดยอาศัยเทคนิคของไดนามิคโปรแกรมมิง และสามารถลดความต้องการจำนวนหน่วยความจำและเวลาคำนวณในเครื่องคอมพิวเตอร์ได้มาก โดยใช้วิธีให้ end state ที่คล้ายกับเทียบเท่ากัน ซึ่งจะทำให้ลดจำนวนสภาพ (state) ลงไปเป็นจำนวนหลายพันสภาพ เช่น กำหนดให้รีแอคติวิตีที่มีค่าต่างกันน้อยกว่า 0.5% อยู่ในสภาพเทียบเท่ากัน

ค่าความเข้มข้นในสภาพสมดุลย์ ซึ่งหาได้จากโปรแกรม SPES CODE อาจใช้เป็น optional constraint เพื่อลดเวลาการคำนวณซึ่งจะหาการจัดเรียงและความเข้มข้นในแกนกลางแรกของเชื้อเพลิง batch size ในการเปลี่ยนเชื้อเพลิงและค่าความเข้มข้น

สำหรับระยะเวลาของวัฏจักรเชื้อเพลิงหาได้โดยให้ค่ารีแอคติวิตีเฉลี่ยของแกนกลาง ขณะที่วัฏจักรได้สิ้นสุดลงมีค่าเท่ากับ 0 ทั้งนี้โดยไม่คิดคำนึงถึงการเบิร์นอัพของพอยซันที่เกิดการเบิร์นอัพได้ สำหรับค่าคงที่ทางด้านนิวเคลียร์นั้นจะหาได้จากโปรแกรม LEOPARD CODE ซึ่งเป็น ZERO DIMENSION MODEL และรีแอคติวิตีกับค่าความเข้มข้นที่เกี่ยวข้อง สามารถได้จากสมการโพลีโนเมียลในรูปฟังก์ชั่นของความเข้มข้นและการเบิร์นอัพ

โปรแกรมเบสท์-5 ส่วนใหญ่จะใช้ในการแก้ปัญหาการออกแบบสำหรับแกนกลางแรก และใช้กฎพื้นฐานของการเข้าใกล้สมดุลย์ซึ่งในโปรแกรมนี้จะมีการคำนวณเกี่ยวกับการยืดเวลาด้วย แต่การคำนวณในด้านกลวิธี สามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ BEST-4 คำนวณได้ ซึ่งโปรแกรมเบสท์-5 นี้เป็นโปรแกรมที่พัฒนาจากโปรแกรมเบสท์-4 อีกทีหนึ่ง

3.3 หลักการคำนวณ

โปรแกรมเบสท์-5 นี้จัดทำขึ้นเพื่อคำนวณลดค่าราคาพลังงานไฟฟ้า (¢/kWhr) ให้น้อยที่สุด โดยคิดคำนวณตลอดอายุของโรงไฟฟ้า โดยพิจารณาจากการหาค่าเหมาะสมของการจัดเรียงและความเข้มข้นของแกนกลาง และปริมาณความต้องการของเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนใส่เข้าไป โดยมี constraint ดังนี้ มีค่า เอ็กซ์เซสรีแอคติวิตี้สูงสุด ณ เวลานำออกจากแกนกลาง ระยะเวลาแต่ละวัฏจักรน้อยที่สุดและมีการจัดเรียงเชื้อเพลิงภายในแกนกลางที่เหมาะสม

สำหรับตัวแปรของปัญหาคือ จำนวนและความเข้มข้นของเชื้อเพลิงที่จะเปลี่ยน ณ ที่จุดเริ่มต้นของแต่ละวัฏจักร ซึ่งไม่สามารถแก้ปัญหาได้ด้วยวิธีธรรมดา แต่สามารถแก้ปัญหาได้โดยวิธีไดนามิคโปรแกรมมิง โดยใช้แนวคิดของ state variable โดยแบ่งปัญหาออกเป็นส่วน (stage) ย่อย ๆ และแก้ปัญหาย่อยนั้นให้ได้ค่าความเหมาะสมที่สุด แล้วจึงนำมาคิดหาความเหมาะสมรวม

สำหรับระบบ (system) ที่อยู่ภายใต้การศึกษานั้นคือ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูซึ่งทำให้เชื้อเพลิงใหม่ไปสู่ค่าที่ต่ำลง ซึ่งระบบที่กล่าวนี้ถูกกำหนดขึ้นโดยจำนวนเชื้อเพลิง ชนิดของเชื้อเพลิงและรีแอคติวิตี้ในแต่ละโซน ถ้าหากมี n โซน จะได้ state matrix = 3n

ตัวแปรในการควบคุม (control variable) คือจำนวนและความเข้มข้นของเชื้อเพลิงที่เปลี่ยน

ดรรชนีแห่งประสิทธิภาพ (efficiency index) ที่เหมาะสมคือราคาพลังงานไฟฟ้า (¢/kWhr cost) ซึ่งได้จากผลรวมของราคาวัฏจักรเชื้อเพลิง โดยคิดจากค่าใช้จ่ายจริงที่เกิดขึ้นในตลอดวัฏจักร ซึ่งเกี่ยวกันกับการใช้เชื้อเพลิงและค่าพลังงานที่ผลิตขึ้นจริง ทั้งนี้ตลอดอายุของโรงงานไฟฟ้า

สำหรับค่าพลังงานทดแทนในช่วงระหว่างหยุดเดินเครื่องหรือลดการผลิตกำลังไฟฟ้าก็เป็นตัวแปรราคาซึ่งเกี่ยวกันกับเวลาเช่นกัน

3.3.1 การหาค่า specific cost

ราคาวัฏจักรเชื้อเพลิง (mills/kWhr) สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Specific cost} = \sum_{i=1}^{M} \left[\frac{F_i \Delta t_i P_i + C_{ki} \Delta t_i H_i (1-P_i)}{\Delta t_i \cdot K_i} \right] \qquad (3.3\text{-}1)$$

i = ดรรชนีแสดงจำนวนวัฏจักร

M = จำนวนวัฏจักรทั้งหมดตลอดอายุการใช้งาน

F_i = ราคาเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นจริงในวัฏจักรที่ i ราคานี้จะถูกเทียบให้เป็นค่าเงินปัจจุบันโดยใช้ present worth factor โดยคิดเทียบเวลาระหว่างที่ค่าใช้จ่ายเกิดขึ้นจริงกับเวลาที่เริ่มเดินเครื่องครั้งแรก (mills/kWhr)

P_i = specific power (ไม่มีหน่วย)

Δt_i = ระยะเวลาของวัฏจักรที่ i

C_{ki} = ราคาพลังงานทดแทนในวัฏจักรที่ i (mills/kWhr)

K_i = present worth factor ที่คำนวณจากระยะเวลาครึ่งหนึ่งของวัฏจักรที่ i กับเวลาที่เริ่มเดินเครื่องครั้งแรก

H_i = present worth factor สำหรับราคาพลังงานทดแทนโดยคิดจากระยะเวลาที่เกิดขึ้นจริงกับเวลาที่เริ่มเดินเครื่องครั้งแรก

3.3.2 การหาค่ารีแอคติวิตี การเบิร์นอัพของเชื้อเพลิงและคาบเวลาของวัฏจักรเชื้อเพลิง

ค่าเวลาของวัฏจักรสิ้นสุดลงเมื่อรีแอคติวิตีเท่ากับ 0 และเมื่อวัฏจักรได้สิ้นสุดลงจะมีการจัดเรียงและเปลี่ยนเชื้อเพลิงใหม่ โดยเปลี่ยนเชื้อเพลิงที่มีรีแอคติวิตีต่ำออก

ค่ารีแอคติวิตีเชื้อเพลิงแต่ละชุดสามารถหาจากฟังก์ชันเส้นตรง สัมพันธ์กับค่าเบิร์นอัพ (I) ทั้งนี้ค่า I นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของเชื้อเพลิงอีกทีหนึ่ง

$$\rho(X, I) = \alpha(X) + \beta(X)\, I \qquad (3.3\text{-}2)$$

$$\alpha(X) = a + b_1 \cdot x + c_1 x^2 \qquad (3.3\text{-}3)$$

$$\beta(X) = a_2 + b_2 \cdot X + c_2 x^2 \qquad (3.3\text{-}4)$$

ซึ่งค่าคงที่ a_1, b_1, c_1 และ a_2, b_2, c_2 สามารถหาได้จากโปรแกรม LEOPARD CODE

ค่า ΔI ในระหว่างวัฏจักร สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\Delta I = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} (n_i \alpha(X_i) - \sum_{i=1}^{N_s} \left[n_i \left\{ \alpha(x_j) + \beta(x_j)\, I_j \right\} \right]}{\sum_{i=1}^{N_t} n_i \beta(X_i)} \qquad (3.3\text{-}5)$$

N_i = จำนวนเชื้อเพลิงในโซน i

N_c = จำนวนโซนที่เปลี่ยนเชื้อเพลิงใหม่

N_s = จำนวนโซนที่มีการเบิร์นอัพ

N_t = จำนวนโซนทั้งหมดในแกนกลาง

ซึ่งถ้าหากมีการยืดเวลาเดินเครื่อง ค่าเบิร์นอัพที่เพิ่มขึ้นจะรวมเข้ากับค่าเบิร์นอัพทั้งหมด และสมการนี้ยังสามารถใช้กับ ขณะที่มีพอยซันที่เบิร์นอัพได้ปรากฏอยู่

ดังนั้นคาบเวลาของวัฏจักร δ_K ซึ่งให้ค่าเบิร์นอัพ ΔI สามารถหาได้ดังนี้

$$\delta_K = \frac{\Delta I_K \, \eta \sum_{i=1}^{N_t} n_i p_i}{10^3 \, \phi \, W} + \sigma_K + \tau_K \qquad (3.2\text{-}6)$$

η = ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้า

ϕ = ตัวประกอบโหลดต่ำ (loading factor)

W = กำลังการผลิตไฟฟ้า

p_i = น้ำหนักของเชื้อเพลิงในโซนที่ i

σ_K = เวลาที่ยืดออกไป

τ_K = เวลาที่หยุดเครื่องปฏิกรณ์

สำหรับการแก้ไขค่าเบิร์นอัพในกรณีเกิด power sharing นั้น ทำได้โดยนำสัมประสิทธิ์ค่าหนึ่งคูณเข้ากับค่าเบิร์นอัพของโซน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์นี้หาได้โดย

$$i = \frac{1+\Delta K_i}{1+\Delta K_{avg}} \qquad (3.3\text{-}7)$$

$$\Delta K_i = n_i \rho_i \qquad (3.3\text{-}8)$$

$$K_{avg} = \frac{1}{N_E} \sum_{i=1}^{N_Z} \rho_i n_i \qquad (3.3\text{-}9)$$

โดย n_i = จำนวนเชื้อเพลิงในโซน i

ρ_i = รีแอคติวิตีของเชื้อเพลิงในโซน i

N_E = จำนวนเชื้อเพลิงในแกนกลางทั้งหมด

N_Z = จำนวนโซน

3.3.3 <u>การหาค่าความเข้มข้นของยูเรเนียมและพลูโตเนียมในแกนกลางโดยใช้ล่มการโพลิโนเมียล</u>

3.3.3.1 <u>การหาค่าความเข้มข้นของยูเรเนียม -235 ในแกนกลาง</u>

x_i = ฟังก์ชั่น (ความเข้มข้นของเชื้อเพลิง, เบิร์นอัพ)

$$x_i = (Z_{au}+Z_{bu}x_a+Z_{cu}x_a^2) + (Z_{du}+Z_{eu}x_a+Z_{fu}x_a^2)\ I + (Z_{gu}+Z_{hu}x_a+Z_{iu}x_a^2)I^2 \qquad (3.3\text{-}10)$$

x_i = ความเข้มข้นของยูเรเนียม -235 ในแกนกลาง

Z_{xu} , (x=a, b, c, d, e, f, g, h, i) = ค่าคงที่ของล่มการ

x_a = ความเข้มข้นเดิมของเชื้อเพลิง

I = ค่าเบิร์นอัพ

3.3.3.2 การหาค่าความเข้มข้นของพลูโตเนียม -239 ในแกนกลาง

X_{pi} = ฟังก์ชั่น (ความเข้มข้นของเชื้อเพลิง, เบิร์นอัพ)

$$X_{pi} = (Z_{ap} + Z_{bp}X_a + Z_{cp}X_a^2) + (Z_{dp}+Z_{ep}X_a+Z_{fp}X_a^2)\ I + (Z_{gp}+Z_{hp}X_a+Z_{ip}X_a^2)\ I^2 \quad (3.3\text{-}11)$$

X_{pi} = ความเข้มข้นของพลูโตเนียม -239 ในแกนกลาง

Z_{xp} , (x = a, b, c, d, e, f, g, h, i) = ค่าคงที่ของสมการ

3.3.4 การคำนวณหาราคาวัฏจักรเชื้อเพลิง

3.3.4.1 การคำนวณหาราคาขององค์ประกอบวัฏจักรเชื้อเพลิงที่ใช้ในโปรแกรม

ก. ราคาของยูเรเนียม , C_{lk}

$$C_{lk} \equiv 2.6128\ U.\ YVUl\ (1+F_l+C_l) \sum_{i=1}^{N_t} (n_i p_i \frac{X_i - X_t}{0.711 - X_t}) \quad (3.3\text{-}12)$$

2.6128 = จำนวนปอนด์ของ U_3O_8 ต่อน้ำหนัก U 1 กิโลกรัม

U = ราคาของ U_3O_8 , \$/lb

YVUl = ตัวประกอบการแปรเปลี่ยนของราคาจัดซื้อยูเรเนียม

F_l = อัตราส่วนความสูญเสียยูเรเนียมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง

C_l = อัตราส่วนความสูญเสียยูเรเนียมในการทำคอนเวอร์ชัน

n_i = จำนวนเชื้อเพลิงในโซน i

p_i = น้ำหนักของเชื้อเพลิงในโซน i

X_i = ความเข้มข้นของ U-235 ในโซน i, %

X_t = ความเข้มข้นของทีพลีทเต็ดยูเรเนียม (U-235), %

0,711 = ความเข้มข้นของ U-235 ในธรรมชาติ , %

N_t = จำนวนโซน

i = ดรรชนีแสดงโซน

(ลองเปรียบเทียบสมการกับสมการในหัวข้อ 2.6.1)

ข. ราคาการทำให้เข้มข้น , C_{2k}

$$C_{2k} = (1+F_1) \sum_{i=1}^{N_t} n_i p_i (1+D_1) \left[\frac{X_i - X_t}{0.711 - X_1} \left\{ C_{1a} + 2.6128\ U.YUV1.D_1 \right\} \right.$$

$$\left. + C_b .\ VB_k .\ B(X_i) \right] \qquad (3.3\text{-}13)$$

C_b = Separative cost, $/SWU

VB_k = ตัวประกอบการแปรเปลี่ยนของราคา separative work

D_1 = อัตราค่าภาษีคิดคำนวณจากราคายูเรเนียม

C_{1a} = ราคาคอนเวอร์ชันยูเรเนียมให้เป็น UF_6, $/KgU

$B(X_i)$ = Separative work unit (SWU) เพื่อให้ได้มาซึ่งความเข้มข้น X_i

$$B(X_i) = (1-0.02X_i)\log\frac{(100-X_i)}{X_i} + \frac{X_i - 0.711}{0.711 - X_t}\log\frac{(100-X_t)}{X_t}(1-0.02X_t)$$

$$- \frac{X_i - X_t}{0.711 - X_t}(1-0.02\cdot 0.711)\log\frac{(100-0.711)}{0.711} \qquad (3.3\text{-}14)$$

สำหรับในโปรแกรมเบสท์-5 ได้กำหนด C_{1a} เป็นตัวคงที่มีค่า = 2.5 ดังนั้น สมการ (3.3-13) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$C_{2k} = (1+F_1) \sum_{i=1}^{N_t} n_i p_i (1+D_1) \left[\frac{X_i - X_t}{0.711 - X_t} \left\{ 2.5 + 2.6128\ U.YUV1.D_1 \right\} \right.$$

$$\left. + C_b .\ VB_k .\ B(X_i) \right] \qquad (3.3\text{-}15)$$

(ลองเปรียบเทียบสมการกับสมการในหัวข้อ 2.6.1)

ค. ราคารีโพรเซ่สซึ่ง , C_{3k}

$$C_{3k} = C_R \cdot VR_k \sum_{i=1}^{N_t} n_i p_i \cdot 0.965 \qquad (3.3\text{-}16)$$

C_R = ราคารีโพรเซ่สซึ่ง , \$/Kg

VR_k = ตัวประกอบการแปรเปลี่ยนของราคารีโพรเซ่สซึ่ง

ง. ราคาสำหรับพลูโตเนียมเครดิต, C_{4k}

$$C_{4k} = - \sum_{i=1}^{N_t} \left[0.965\ n_i p_i \left\{ \frac{X_{zi}-X_t}{0.711-X_t} (2.6128\ U.YVU2+2.5) \right. \right.$$

$$\left. \left. +0.9751\ C_b.VB_k.B(X_{zi})+0.985\ C_p.VP_k.G(X_i,I_i) \right\} \right] \qquad (3.3\text{-}17)$$

X_{zi} = ความเข้มข้นของยูเรเนียม -235 ของเชื้อเพลิงใช้แล้ว

C_p = มูลค่าพลูโตเนียม , \$/gr.

VP_k = ตัวประกอบการแปรเปลี่ยนของมูลค่าพลูโตเนียม

$G(X_i,I_i)$ = ปริมาณพลูโตเนียมของเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วคำนวณจากสมการ (3.3-11)

YVU2 = ตัวประกอบการแปรเปลี่ยนของราคาขายยูเรเนียม

<u>หมายเหตุ</u> : ค่า C_{4k} มีค่าเป็นลบ เพราะถือว่าเป็นรายรับของวัฏจักรเชื้อเพลิง

จ. ราคารีโพรเซ่สซึ่งของวัฏจักรเชื้อเพลิงสุดท้าย, C_{5k}

สมการหาค่าราคาของ C_{5k} จะเป็นสมการเดียวกันกับสมการของ C_{3k} คือสมการ (3.3-16)

ฉ. ราคาสำหรับพลูโตเนียมเครดิตของวัฏจักรเชื้อเพลิงสุดท้าย, C_{6k}

ทำนองเดียวกับข้อ จ. สมการหาค่าราคาของ C_{6k} คือสมการ (3.3-17)

ช. ราคาเชื้อเพลิงของพลังงานทดแทนในขณะเดินเครื่องและในขณะยืดเวลาเดินเครื่อง, C_{7k}

ข.1 ราคาเชื้อเพลิงของพลังงานทดแทนในขณะเดินเครื่อง , C'_{7k}

$$C'_{7k} = 24W \cdot W_r \cdot V_{rk} \delta_k \ (1-\emptyset) \qquad (3.3\text{-}18)$$

W = กำลังการผลิตไฟฟ้าที่กำหนดไว้, MW_e

W_r = ราคาเชื้อเพลิงของพลังงานทดแทน, mills/kWhr

V_{rk} = ตัวประกอบคาดคะเนการแปรเปลี่ยนของราคาพลังงานทดแทน

δ_k = ระยะเวลาของวัฏจักร k, วัน

ข.2 ราคาเชื้อเพลิงของพลังงานทดแทนในขณะยืดเวลาเดินเครื่อง , C''_{7k}

$$C''_{7k} = W.W_r .V_{rk}. B_t \qquad (3.3\text{-}19)$$

B_t = ค่าคงที่ในการคำนวณขณะยืดเวลาเดินเครื่องเทียบได้กับช่วงเวลา (time interval) สำหรับการยืดเวลาเดินเครื่อง

ดังนั้น $C_{7k} = C'_{7k} + C''_{7k}$ (3.3-20)

ข. ราคาเชื้อเพลิงของพลังงานทดแทนในขณะที่หยุดเครื่อง , C_{8k}

$$C_{8k} = 24W.W_r V_{rk} \tau_k \qquad (3.3\text{-}21)$$

τ_k = ช่วงระยะเวลาในการหยุดเดินเครื่อง , วัน

ฌ. ราคาผลิตเชื้อเพลิง , C_{9k}

$$C_{9k} = F_k.VF_k \ (1+D_2) \sum_{i=1}^{N_t} n_i P_i \qquad (3.3\text{-}22)$$

F_k = ราคาผลิตเชื้อเพลิง, $/Kg

VF_k = ตัวประกอบการแปรเปลี่ยนของราคาผลิตแท่งเชื้อเพลิง

D_2 = อัตราค่าภาษีของการผลิตเชื้อเพลิง

ดังนั้นเมื่อให้ราคารวมขององค์ประกอบวัฏจักรเชื้อเพลิงที่วัฏจักร $k = C_{hk}$

$$C_{hk} = C_{1k}+C_{2k}+C_{3k}+C_{4k}+C_{5k}+C_{6k}+C'_{7k}+C''_{7k}+C_{8k}+C_{9k} \qquad (3.3\text{-}23)$$

3.3.4.2 การคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้

$$E = 8760\ \phi_k\ W \qquad (3.3\text{-}24)$$

8760 = จำนวนชั่วโมงใน 1 ปี (โดยคิดที่ 1 ปี มี 365 วัน)

ϕ_k = โหลดแฟคเตอร์ในวัฏจักร

W = กำลังการผลิตไฟฟ้าที่กำหนดไว้,

แต่เนื่องจากในการคิดองค์ประกอบราคาเชื้อเพลิงได้คิดที่กำลังการผลิตไฟฟ้าที่กำหนดไว้ (W) ตลอดเวลา โดยมีการทดแทนพลังงานที่ไม่สามารถผลิตได้ตามเป้าหมาย นั่นคือ $\phi_k = 1$ ดังนั้นในโปรแกรมจะคิดค่าพลังงานไฟฟ้า ดังนี้

$$E = 8760\ W \cdot YVW$$

YVW = ตัวประกอบการแปรเปลี่ยนของพลังงานไฟฟ้า

3.3.4.3 การคำนวณหาราคาวัฏจักรเชื้อเพลิง

$$C = \sum_{k=1}^{N} \frac{\sum_{h=1}^{g} C_{hk}\ \psi_{hk}}{8760\ W \cdot YVW \cdot \psi_k} \qquad (3.3\text{-}25)$$

C = ราคาวัฏจักรเชื้อเพลิง, mills/KWhr

N = จำนวนวัฏจักรในคาบเวลาที่ทำการศึกษา

ψ_k = present worth factor โดยคิดเวลาที่ล่วงเลยไปมีค่าเท่ากับช่วงระยะเวลานับจากครึ่งหนึ่งของวัฏจักร k กับเวลาที่เริ่มเดินเครื่องครั้งแรก

ψ_{hk} = present worth factor โดยคิดเวลาที่ล่วงเลยไปมีค่าเท่ากับช่วงระยะเวลานับจากขณะที่ปรากฏรายการใช้จ่ายกับเวลาที่เริ่มเดินเครื่องครั้งแรก

3.4 โปรแกรมหลักและโปรแกรมย่อย

ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เบส์ท-5 จะประกอบด้วยโปรแกรมหลัก 1 โปรแกรม โปรแกรมย่อยสับรูทีน 17 โปรแกรม โปรแกรมย่อยฟังก์ชั่น 5 โปรแกรม (โปรแกรมภาษาโฟร์แทรน -IV 2 โปรแกรม และภาษาแอล่เซมเบลอร์ 3 โปรแกรม) และ Block data 1 โปรแกรม จำนวนโปรแกรมทั้งสิ้น 24 โปรแกรม ในที่นี้จะกล่าวสรุปถึงหน้าที่ของโปรแกรมที่สำคัญเท่านั้น

ก. โปรแกรมหลักทำหน้าที่อ่านข้อมูล คำนวณค่าต่าง ๆ ที่จะใช้ในขั้นตอนต่อไปเรียกโปรแกรมย่อยมาใช้งานตามความเหมาะสมและแสดงผลพิมพ์

ข. สับรูทีน COSTA ทำหน้าที่คำนวณ C_{1k}, C_{2k} และ C_{9k}

ค. สับรูทีน COSTB ทำหน้าที่คำนวณหาค่า C_{3k}, C_{4k} และ C_{5k}, C_{6k} ตามขั้นตอนของการใช้งาน

ง. สับรูทีน COSTC ทำหน้าที่หาค่า C_{7k}, C_{8k} และ C_{hk} รวมทั้งคำนวนค่าพลังงานและหาค่า C

จ. สับรูทีน LOOP เป็นโปรแกรมย่อยที่มีความสำคัญรองจากโปรแกรมหลักมี 5 nested loops คือ externalmost, external, middle, inner และ innermost ซึ่งจะคำนวณค่าต่าง ๆ ตลอดวัฏจักรทั้งหมด เวคเตอร์ควบคุมสภาพทั้งหมดในวัฏจักร สภาพที่อยู่ในพื้นที่และในโซนซึ่งทั้ง 5 nested loops นี้จะถูกเรียกจากโปรแกรมหลัก ทำหน้าที่คำนวณและเลือกค่าที่เหมาะสมตลอดอายุของโรงไฟฟ้า และพิมพ์ค่าราคาต่ำสุด 20 ค่าและราคาสูงสุด 5 ค่าของแต่ละวัฏจักร ทั้งนี้โดยที่สับรูทีน LOOP จะเรียกใช้สับรูทีนอื่นเข้ามาช่วยในการทำงานอยู่ตลอดเวลา

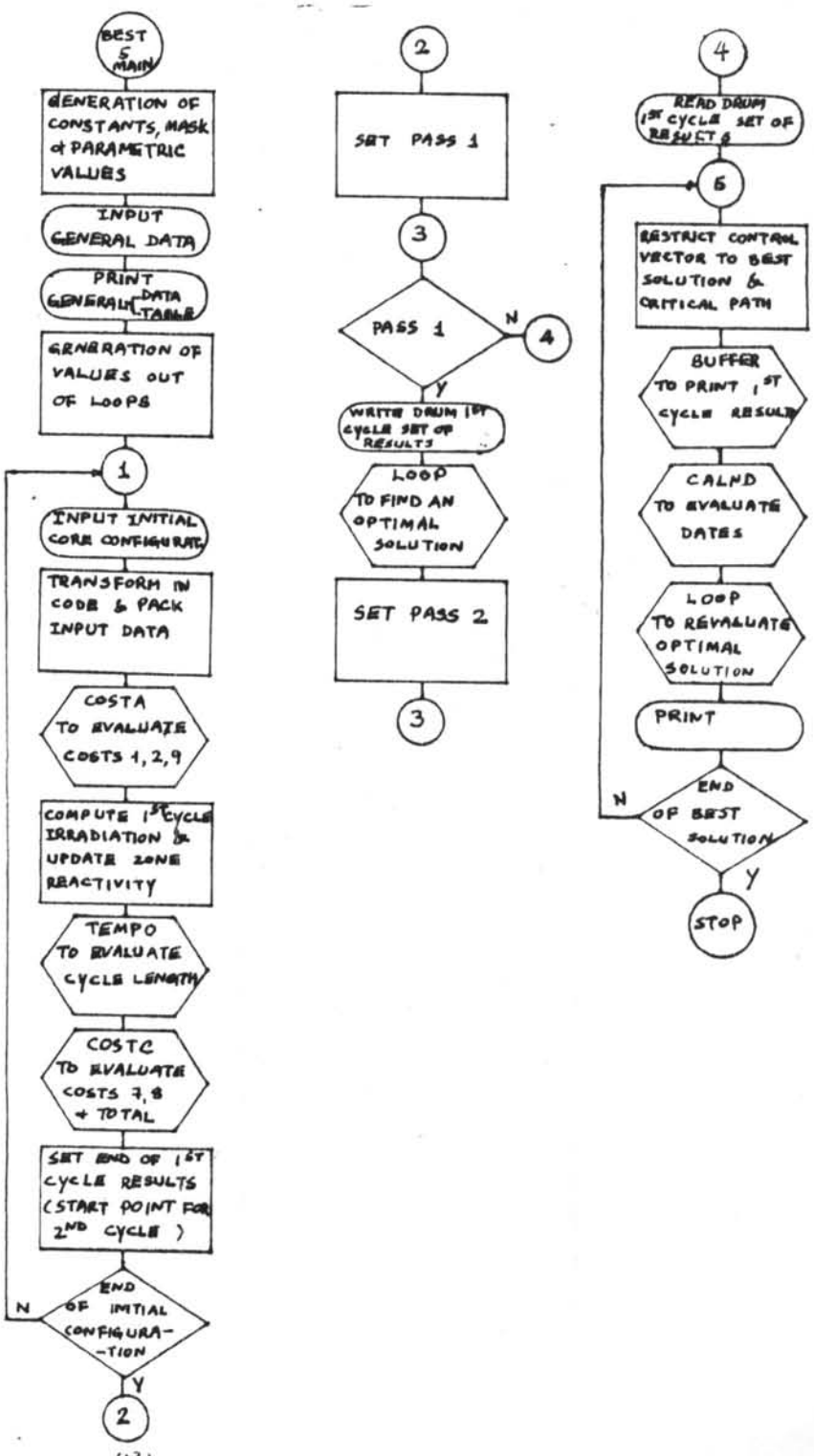
ฉ. สับรูทีน EXPAND สำหรับตรวจสอบการ overflow เนื่องจากเวลาและหาค่าราคาต่าง ๆ ในฟังก์ชั่นของเวลา โดยมีตัวประกอบการคาดคะเนราคาเข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อจะได้ใช้เป็นค่าคำนวณในขั้นตอนต่อไป

ช. สับรูทีน TEMPO ทำหน้าที่หาช่วงเวลาของแต่ละวัฏจักร จะมีการตรวจสอบการถึงอายุของโรงไฟฟ้า และเปรียบเทียบหาค่าของเวลาเพื่อส่งผลไปยังสับรูทีน EXPAND ทำการตรวจสอบการ overflow

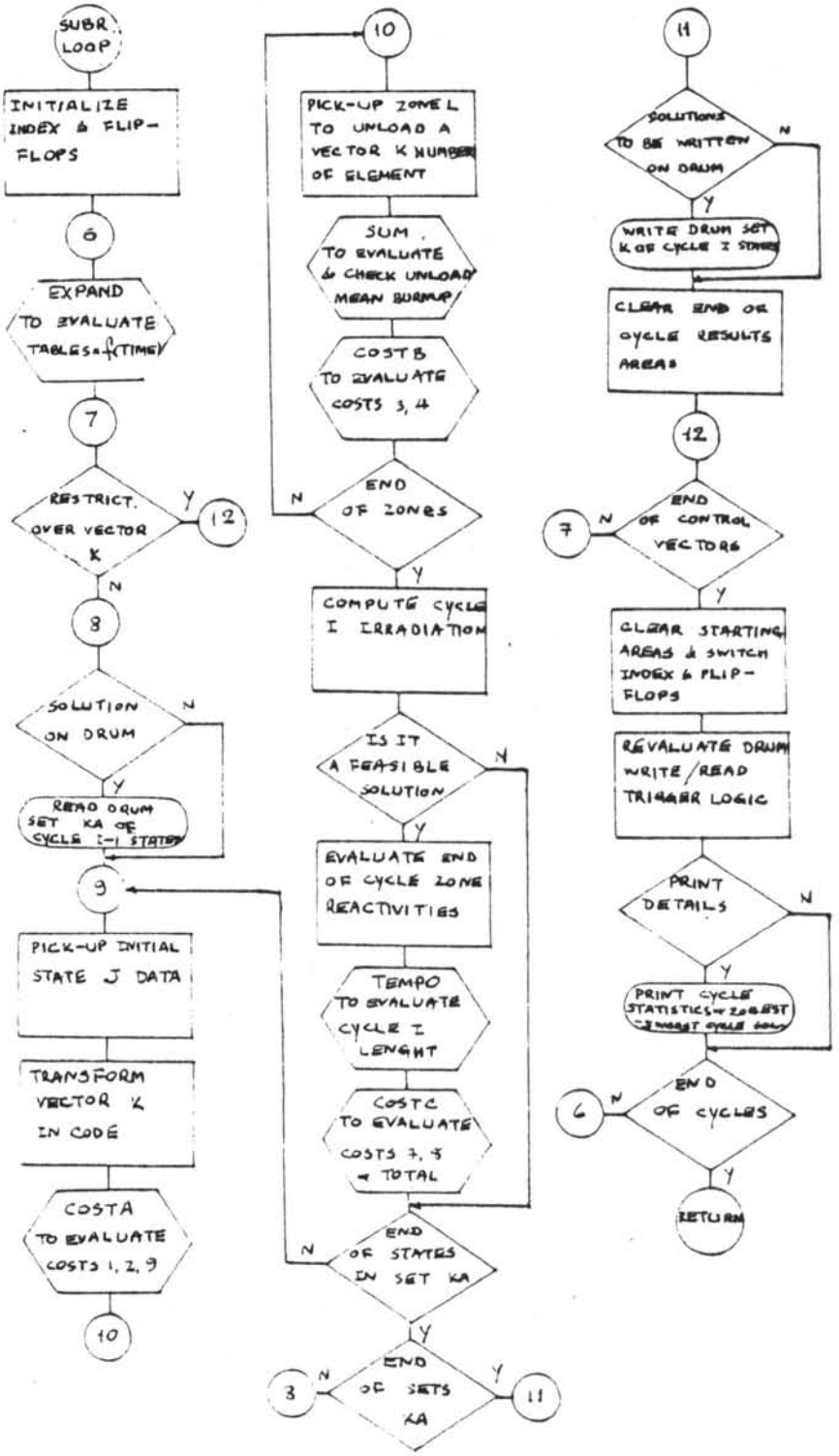
ซ. สับรูทีน CHECK ทำการตรวจสอบค่าเบิร์นอัพสูงสุด

ฌ. สับรูทีน OTT ทำหน้าที่เลือกค่าราคาต่ำที่สุด 20 ค่าและค่าราคาสูงสุด 5 ค่าในแต่ละวัฏจักร

ญ. สับรูทีน WRIT และ STAMPA ใช้สำหรับการพิมพ์ผลการคำนวณของแต่ละวัฏจักรและผลลัพธ์อื่น ๆ ที่ได้จากการคำนวณ

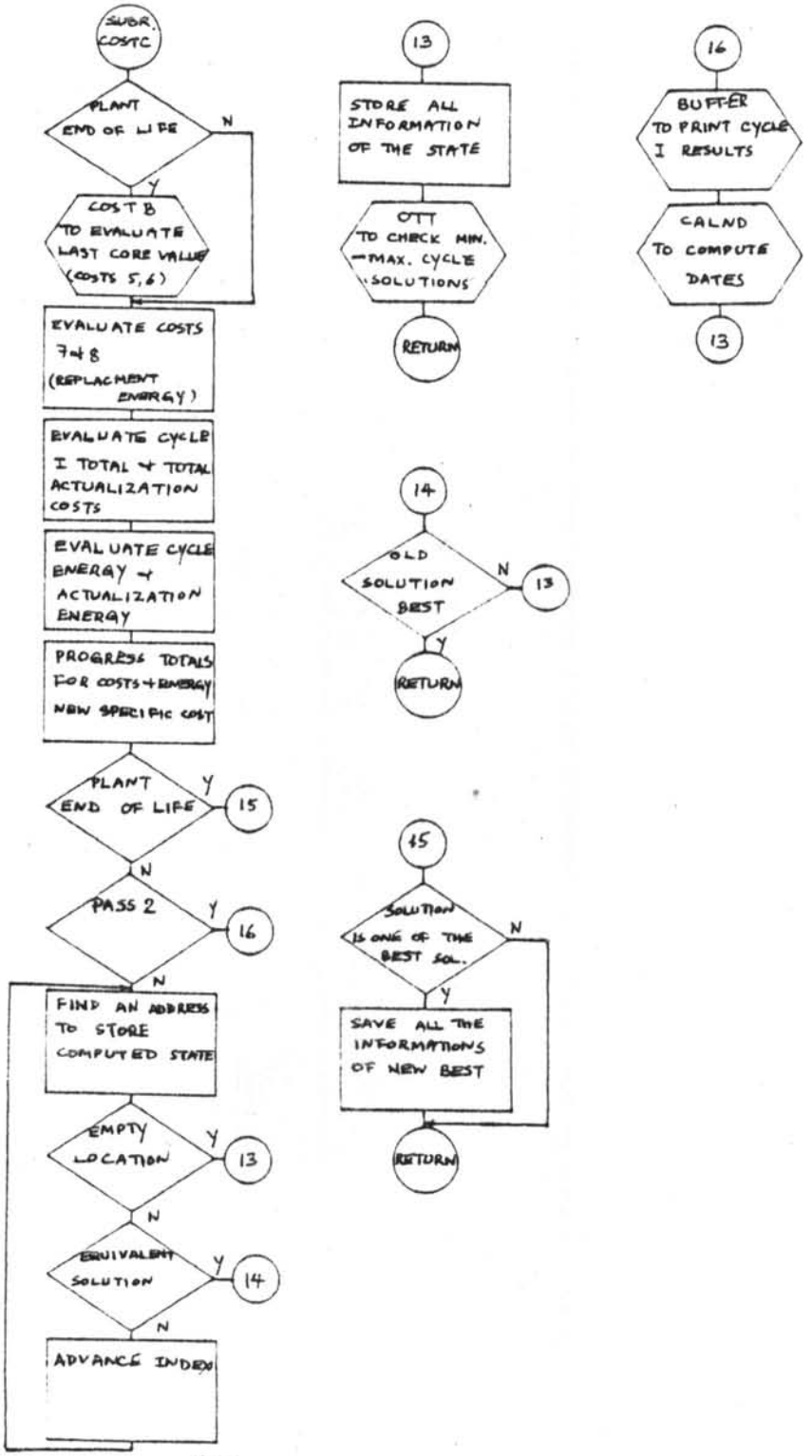


รูปที่ 3.4-1 (13) แผนผังย่อแสดงขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรมหลัก



(13)

รูปที่ 3.4-2 แผนผังย่อแสดงขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรมย่อยสำคัญ


SUBR. COSTC
PLANT END OF LIFE
N
Y
COST B TO EVALUATE LAST CORE VALUE (COSTS 5,6)
EVALUATE COSTS 7+8 (REPLACMENT ENERGY)
EVALUATE CYCLE I TOTAL + TOTAL ACTUALIZATION COSTS
EVALUATE CYCLE ENERGY + ACTUALIZATION ENERGY
PROGRESS TOTALS FOR COSTS + ENERGY NEW SPECIFIC COST
PLANT END OF LIFE
Y
15
N
PASS 2
Y
16
N
FIND AN ADDRESS TO STORE COMPUTED STATE
EMPTY LOCATION
Y
13
N
EQUIVALENT SOLUTION
Y
14
N
ADVANCE INDEX
13
STORE ALL INFORMATION OF THE STATE
OTT TO CHECK MIN. =MAX. CYCLE SOLUTIONS
RETURN
16
BUFFER TO PRINT CYCLE I RESULTS
CALND TO COMPUTE DATES
13
14
OLD SOLUTION BEST
N
13
Y
RETURN
15
SOLUTION IS ONE OF THE BEST SOL.
N
Y
SAVE ALL THE INFORMATIONS OF NEW BEST
RETURN

(13)

รูปที่ 3.4-2 (ต่อ)

ฎ. BLOCK DATA ทำหน้าที่กำหนดค่าให้แก่ตัวแปรต่าง ๆ ที่ระดับ compiler เพื่อให้การเตรียม input ง่ายขึ้น เช่น correction table, escalation table ค่าคงที่ต่าง ๆ เพื่อที่จะใช้ในการคำนวณ

สำหรับขั้นตอนการคำนวณโดยสังเขป ดังแสดงแผนผังย่อ ในรูป 3.4-1 และ 3.4-2 ตัวโปรแกรมเบสท์-5 นี้มีจำนวนบัตร 3,656 บัตร และโปรแกรมแอสเซมเบลอร์ 3 โปรแกรมมีบัตรจำนวน 56 บัตร ดังนั้นโปรแกรมนี้ใช้บัตรทั้งหมด 3,712 บัตร

3.5 พารามิเตอร์ของโปรแกรมเบสท์-5 (IBM 370 version)

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับเครื่อง IBM 370 มีค่าต่างจากค่าที่ใช้ในเครื่อง UNIVAC เนื่องจากจำนวนบิท (bits) ต่างกันคือ ของ IBM มี 32 บิท ส่วน UNIVAC มี 36 บิท ค่าต่าง ๆ ของพารามิเตอร์มีดังนี้

M1 ฟังก์ชั่นของขนาดหน่วยความจำ ถ้าเป็นไปได้จะมีค่าอยู่ในรูปของ 2 ยกกำลัง

= 2,048

M2 จำนวนคอนโทรลเวคเตอร์ ควรจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ 7

= 7

M3 จำนวนโซน ควรจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ 4

= 4

M4 จำนวนวัฏจักรโดยข้อกำหนด M4 x M13 ควรจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ 32 x 2

= 20

M5 จำนวนค่า Sub multiple (เช่น จำนวนเยื้อเพลิง) ที่กำหนดลงไปในโค้ด ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับโรงไฟฟ้า ใช้เพื่อลดขนาดของ batch size

= 14

M6 จำนวนวัฏจักรซึ่งห้ามการบันทึกลงในจานแม่เหล็ก ไม่ขึ้นกับระบบอัตโนมัติของโปรแกรม

= 20

M7 จำนวนข้อมูลความเข้มข้น ควรจะน้อยกว่าหรือเทียบเท่า 15

= 15

M8 ฟังก์ชั่นของจำนวนระดับรีแอคติวิตี มีค่าเท่ากับจำนวนบิท (bit) ที่ใช้แสดงค่าควรจะเท่ากับ 8 (สำหรับเครื่อง IBM 370)

= 8

M9 ฟังก์ชั่นของ M7 ควรจะมีค่าเท่ากับ 4

= 4

M10 จำนวนระดับรีแอคติวิตี ขึ้นอยู่กับค่ารีแอคติวิตีและหน่วยความจำควรจะมีค่าน้อยกว่า 256 และขณะที่จำนวนระดับรีแอคติวิตีมี 128 ระดับค่า 85 เป็นค่าที่จะเหมาะสม

= 85

M11 ฟังก์ชั่นของ M8 มีค่าเท่ากับ 2^{M8} เป็นจำนวนค่าที่มากที่สุดในรูปของ code ที่แสดงถึงจำนวนเชื้อเพลิง

= 256

M12 ฟังก์ชั่นของ M9 มีค่าเท่ากับ 2^{M9}

= 16

M13 ฟังก์ชั่นของ M2 แสดงจำนวนบิทที่ต้องการสำหรับระบุค่า M2 (ตรรย่นีของคอนโทรลเวคเตอร์)

= 3

M14 จำนวนคาบที่คำนวณหา ควรจะเท่ากับหรือมากกว่า M4/2

= 15

M15 จำนวนค่าผลลัพธ์เหมาะสมที่สูงที่สุด ควรจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10

= 8

M16 จำนวนวัฏจักรซึ่งจะข้ามค่าราคาที่สูงที่สุด ควรจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ M14 แต่โดยมากจะให้ค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 7

= 10

M18 จำนวนเชื้อเพลิงอยู่ในรูป code ซึ่งใช้ในกรณี extra reactivity

= 0 (ไม่มีการ shetch-out แท่งเชื้อเพลิง)

M19 ระดับยื่นของ extra reactivity

= 0

M20 ตัวประกอบการเปลี่ยนเชื้อเพลิง (reloaded factor) ต้องไม่มากกว่า

= 3

M21 จำนวนเชื้อเพลิงสูงสุดที่อยู่ในแกนกลาง (ในสภาพ code)

= 40

M22 วัฏจักรที่ทำการใช้ extra reactivity ด้วยเชื้อเพลิงจำนวนใน M18 มักจะเท่ากับ M20

= M20 = 3

พารามิเตอร์ M1, M2, M4, M7, M10, M14, M21 จะควบคุมขนาดของ area จะต้องระวังในการกำหนดค่าต่อพารามิเตอร์เหล่านี้ ซึ่งจะทำให้เกิดภาวะ memory overflow ได้

พารามิเตอร์ M8 และ M11 มีความสัมพันธ์กันดังนี้ $2^{M8} = M11$

พารามิเตอร์ M9 และ M12 มีความสัมพันธ์กันดังนี้ $2^{M9} = M12$

พารามิเตอร์ M3 และ M8 มีความสัมพันธ์กันด้วย M3 x M8 = 32 และค่า M3 จะต้องไม่เกิน 4

พารามิเตอร์ M13 และ M2 มีความสัมพันธ์กันด้วย $2^{M13} = M2+1$

พารามิเตอร์ M6, M15, M16 จะทำให้เวลาในการคำนวณและจำนวนผลพิมพ์อยู่ในภาวะเหมาะสม

พารามิเตอร์ M18 และ M19 ทำหน้าที่กำหนด extra reactivity สำหรับระดับการเบิร์นอัพเชื้อเพลิงต่อจาก M22 จะต้องระวังการมีผลกระทบต่อ IRRM1 และ IRRM2

พารามิเตอร์ M3, M5, M9, M11, M12, M13 จะถูกกำหนดเป็นส่วนย่อยภายใน words ของคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ

- กลุ่ม area ใหญ่ จะเป็นฟังก์ชั่นของระดับรีแอคติวิตี
- กลุ่ม area เล็ก จะเป็นฟังก์ชั่นของชนิดเชื้อเพลิง
- paths จะเป็นฟังก์ชั่นของคอนโทรลเวคเตอร์

3.6 ข้อมูล (Data)

3.6.1 ข้อมูลที่กำหนดไว้ใน Block Data แล้ว

YTHK (I,J) = เวลาที่เกิดการใช้จ่ายเมื่อสัมพันธ์กับวัฏจักร N และองค์ประกอบราคาวัฏจักร J ซึ่งมี Dimension (3, 9) โดยที่

I = 1 สำหรับวัฏจักรที่ 1

I = 2 สำหรับวัฏจักรที่ 2 จนถึงวัฏจักรที่ N-1

I = 3 สำหรับวัฏจักรที่ N

YV_{jk} หรือ YDUM = ตารางเกี่ยวกับการคาดคะเนราคาโดยสัมพันธ์กับองค์ประกอบราคาวัฏจักร j และตลอดคาบเวลา K ในที่นี้ได้แก่

YVU1, YVU2, YVP(=VP_k), YVB(=VB_k)

YVR(=VR_k), YVF(=VF_k), YVG(=V_{rk}), YVW

Z_xo (x = a, b, c, d, e, f) = ค่าคงที่สำหรับหาค่ารีแอคติวิตี (สมการ 3.3-3 และ 3.3-4)

Z_xU (x = a, b, c, d, e, f, g, h, i) = ค่าคงที่สำหรับหาค่าความเข้มข้นของยูเรเนียมในแกนกลางโดยเป็นฟังก์ชั่นกับความเข้มข้นของเชื้อเพลิงและเบิร์นอัพ (สมการ 3.3-10)

Z_xP (x = a, b, c, d, e, f, g, h, i) = ค่าคงที่สำหรับหาค่าจำนวนพลูโตเนียมที่เกิดขึ้นโดยเป็นฟังก์ชั่นกับความเข้มข้นของเชื้อเพลิงและเบิร์นอัพ (สมการ 3.3-11)

ZVA, ZVB = ค่าคงที่สำหรับควบคุมรีแอคติวิตีสูงสุด

ZIRSTR, XWSTR, XASTR, XMNSTR = ค่าคงที่ใช้ในการคำนวนการยืดเวลาการเดินเครื่อง

XDOLL = ค่าคงที่ที่ใช้สำหรับแปลงค่า mills ให้อยู่ในรูปเงินลีร์อิตาลี

XSMIN = ระดับราคา mills/kWhr สำหรับการควบคุมค่าราคาที่มากที่สุด

XCBASE = ค่าคงที่ที่ใช้สำหรับแก้ไขค่าแฟคเตอร์การแปรเปลี่ยนในวัฏจักรที่ 1

X750, XFTA4, XFTA3, XF2B, XF9A, XF9B = ค่าคงที่สำหรับการคำนวณราคาองค์ประกอบวัฏจักรเชื้อเพลิง

MCLIM = ค่าขอบเขตสำหรับ disk flip/flop

FF(2) = เป็นตัวเลขที่กำหนดการ flip/flop

MHFA (3) = เป็นตัวเลขกำหนด data set reference number ในเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้กับการทดลองในฉานแม่เหล็ก

TBAN (12) = จำนวนวันในเดือนต่าง ๆ

3.6.2 ข้อมูลที่ต้องป้อนเข้าไปและรูปแบบของข้อมูล (Input data และ FORMAT)

โปรแกรมนี้ป้อนข้อมูลโดยใช้บัตรคอมพิวเตอร์ ซึ่งถ้าให้พารามิเตอร์ต่าง ๆ คงที่ตามที่โปรแกรมได้กำหนดไว้ จำนวนบัตรข้อมูลที่ส่งเข้าไปจะมีทั้งหมด 107 ใบ ความหมายของข้อมูลและรูปแบบข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 3.6.1 และตารางที่ 3.6.2 จะแสดงขอบเขตข้อมูลของแต่ละข้อมูลใน Fortran Coding Form

ตารางที่ 3.6-1 ตารางแสดงข้อมูลที่ต้องป้อนเข้าไปในเครื่องคอมพิวเตอร์

บัตรใบที่	ชื่อบัตร	รูปแบบข้อมูล	ชื่อข้อมูล	ความหมายของข้อมูล
1 - 4	บัตรหัวเรื่อง (Heading Card)	(16A5)	FMT	เป็นบัตรที่ใช้เจาะข้อความใด ๆ ตามที่ต้องการ
5	บัตรวันเดือนปีที่เริ่มเดินเครื่อง		DAY	วัน
	(Date Card)	(6I5)	MESE	เดือน
			ANNO	ปี
6	บัตรแสดงพารามิเตอร์ ดรรชนีและการเลือก	(20I4)	NCAS	จำนวนการเลือกการจัดการเชื้อเพลิงในแกนกลางแรก
	(Parameter - Indexs - Options		NARR	จำนวนชนิดความเข้มข้นของเชื้อเพลิง
	Card)		CICLI	จำนวนวัฏจักรที่มากที่สุด
			KR	ถ้า = 1 จะ restriction ต่อคอนโทรลเวคเตอร์
			DS	ถ้า = 1 จะแสดงผลพิมพ์โดยละเอียด
7	บัตรข้อมูลโรงงาน	(I8, 9F8.4)	ANNI	จำนวนปีที่เดินเครื่อง
	(Plant Data Card)		W	กำลังไฟฟ้า
			YPHI	ยูทิไลเซชันแฟคเตอร์ในขณะเดินเครื่อง
			YETA	ประสิทธิภาพ

ตารางที่ 3.6-1 (ต่อ)

บัตรใบที่	ชื่อบัตร	รูปแบบข้อมูล	ชื่อข้อมูล	ความหมายของข้อมูล
8	บัตรข้อมูลเกี่ยวกับราคา (Charge Card)	(10 F 8.4)	U	ราคายูเรเนียม (U_3O_8), $/lb
			UCB	ราคาการทำให้เข้มข้น , $/SWU
			UCR	ราคารีโพรเซสซิง, $/Kg
			UCP	มูลค่าพลูโตเนียม , $/gr
			UG	ราคาเชื้อเพลิงของพลังงานทดแทน, mills/kWhr
			YLF	อัตราการสูญเสียในการผลิตเชื้อเพลิง
			YLC	อัตราการสูญเสียในการคอนเวอร์ชัน
			YET	ความเข้มข้นของตัวพลีเต็ดยูเรเนียม
9	บัตรข้อมูลทางด้านการเงิน (Financial Data Card)	(10 F 8.4)	YI	Actualization rate
			YD1	อัตราค่าภาษีของมูลค่ายูเรเนียม
			YD2	อัตราค่าภาษีของการผลิตเชื้อเพลิง
10 - 11	บัตรแสดงความเข้มข้น (Enrichment Card)	(10 F 8.4)	XEI_K	ความเข้มข้นของชนิดเชื้อเพลิง K
12 - 13	บัตรเบิร์นอัพ (Barnup Card)	(10 I 8)	$IRMAX_K$	ค่าเบิร์นอัพสูงสุดที่ยอมรับได้สำหรับชนิดเชื้อเพลิง K

ตารางที่ 3.6-1 (ต่อ)

บัตรใบที่	ชื่อบัตร	รูปแบบข้อมูล	ชื่อข้อมูล	ความหมายของข้อมูล
14	บัตรระดับการเบิร์นอัพในวัฏจักร (Cycle Burnup Level Card)	(10 I 8)	IRRM 1	ค่าเบิร์นอัพสูงสุดโดยเฉลี่ยในวัฏจักรที่ 1
			IRRM 2	ค่าเบิร์นอัพสูงสุดโดยเฉลี่ยหลังจากวัฏจักรที่ 1
15 - 16	บัตรน้ำหนักเชื้อเพลิง (Weight Card)	(10 I 8)	P_K	น้ำหนักของชนิดเชื้อเพลิง K, DAG (=Kg x 100)
17	บัตรคอนโทรลเวคเตอร์ (Control Vector Card)	(20 I 4)	V_J	จำนวนเชื้อเพลิงที่เปลี่ยน (reload) ควรจะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของ M15
18	บัตรแสดงดรรชนีความเข้มข้นสำหรับคอนโทรลเวคเตอร์ (Enrichment Index Card for Control Vector)	(20 I 4)	EC_J	เป็นค่าดรรชนี K ที่กำหนดเวคเตอร์ J ซึ่งแสดงค่าของความเข้มข้น
19 - 20	บัตรแสดงค่าเบิร์นอัพในตอนแรกเริ่ม (Stage Burnup Card, initial)	(10 I 5)	IC_I	เป็นค่าเบิร์นอัพเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนเข้าไปใหม่ในวัฏจักร I (ถ้ามี) โดยปกติมักจะให้ค่าเป็น 0
21 - 22	บัตรยืดเวลาการเดินเครื่อง (Stage Stretch-Out Cards)	(10 I 8)	STR_I	จำนวนที่ยืดออกไปในวัฏจักร I
23 - 24	บัตรค่าผลิตเชื้อเพลิง (Fabrication Charge Card)	(10 F 8.4)	XF_I	ค่าผลิตเชื้อเพลิงของวัฏจักร I, $\$/K_g$
25	บัตรระยะเวลาการหยุดเครื่องระหว่างวัฏจักร (Cycle Shutdown Card)	(20 I 4)	TF_I	ระยะเวลาการหยุดเดินเครื่องสำหรับวัฏจักร I, วัน

ตารางที่ 3.6-1 (ต่อ)

บัตรใบที่	ชื่อบัตร	รูปแบบข้อมูล	ชื่อข้อมูล	ความหมายของข้อมูล
26 - 32	บัตรข้อจำกัด (Restriction Card)	(20 I 4)	$RV_{I,J}$	ถ้า = 1 แล้วงว่าเวคเตอร์ J จะไม่สามารถใช้ได้ในวัฏจักร I ถ้า KR = 0 บัตรชุดนี้จะต้องนำออกจากชุดบัตรข้อมูล
33 - 107	บัตร์การจัดการเชื้อเพลิงตอนแรกเริ่ม (Configuration Card)	(6 I 5)	NI_K	จำนวนเชื้อเพลิงในโซน K
			IRI_K	จำนวนเบิร์นอัพตอนเริ่มต้นในโซน K (มักจะให้= 0)
			EI_K	ชนิดความเข้มข้นของเชื้อเพลิงในโซน K (หมายเหตุ บัตรข้อมูลชุดนี้จะมีบัตร 3 ใบต่อการเลือกในการจัดการเชื้อเพลิง (NCAS) 1 ครั้ง)

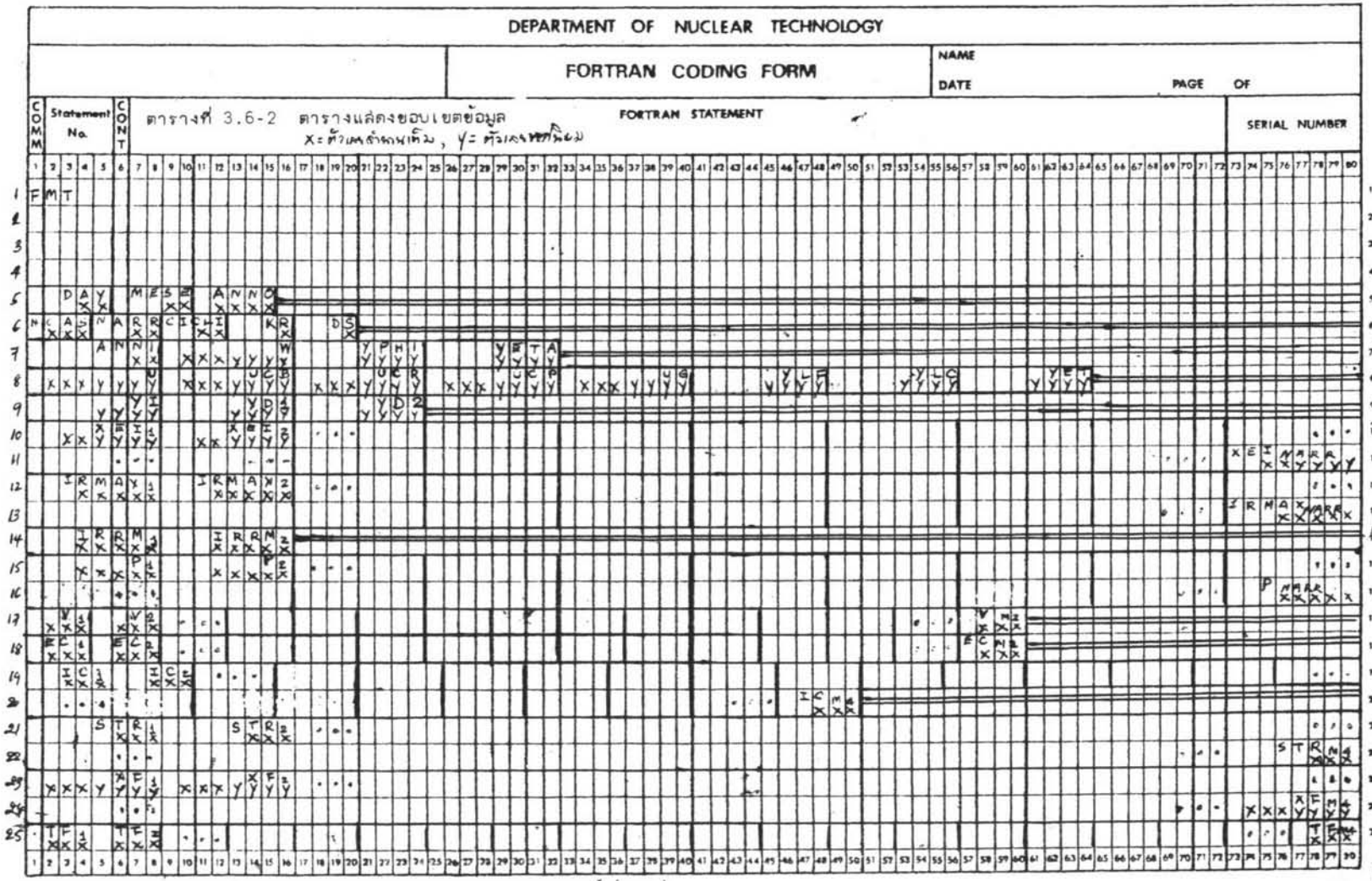
DEPARTMENT OF NUCLEAR TECHNOLOGY

FORTRAN CODING FORM

NAME

DATE PAGE OF

ตารางที่ 3.6-2 ตารางแสดงขอบเขตข้อมูล
X= ตัวเลขจำนวนเต็ม , Y= ตัวเลขทศนิยม



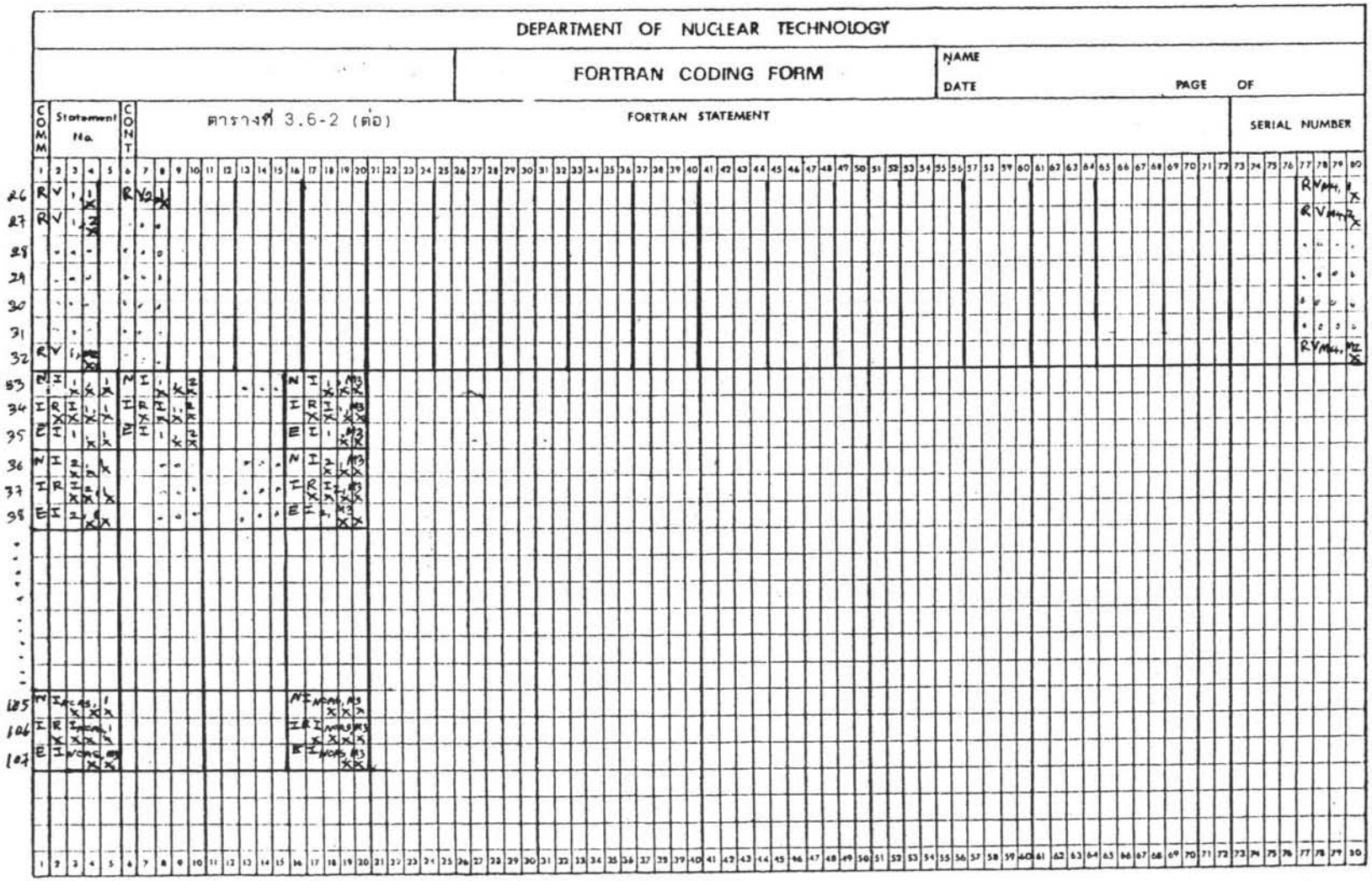
DEPARTMENT OF NUCLEAR TECHNOLOGY

FORTRAN CODING FORM

NAME

DATE PAGE OF

ตารางที่ 3.6-2 (ต่อ)



3.7 การคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์

เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณโปรแกรมนี้นั้นได้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ IBM 370/138 ระบบ DOS แห่งสถาบันบริการคอมพิวเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและเครื่องคอมพิวเตอร์ IBM 370 ระบบ OS แห่งศูนย์ประมวลผลด้วยเครื่องจักรแห่งประเทศไทย สำนักงานสถิติแห่งชาติ โดยโปรแกรมที่ส่งเข้าไปคำนวนอยู่ในรูปบัตรและเทปตามลำดับ โดย JECL ที่ใช้มีดังนี้

3.7.1 JECL ที่ใช้กับเครื่อง IBM 370/138 ระบบ DOS

ดังแสดงใน Coding Form ตารางที่ 3.7-1

3.7.2 JECL ที่ใช้กับเครื่อง IBM 370/303i ระบบ OS

ดังแสดงใน Coding Form ตารางที่ 3.7.2

(เนื่องจากใช้เครื่อง Terminal ในการควบคุมเครื่องจึงแสดงเฉพาะส่วนที่ทดลองในจานแม่เหล็ก)

3.8 ปัญหา อุปสรรค และการแก้ไข

1. ในการทำการศึกษาวิเคราะห์เรื่องนี้ ต้องเสียเวลาไปไม่น้อยในการติดต่อขอความร่วมมือจากต่างประเทศในด้านเอกสารและคอมพิวเตอร์ โค๊ต ทั้งนี้เพราะในประเทศไทยยังไม่มีเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้งานในเชิงพาณิชย์ จึงขาดแคลนผู้ที่รู้ซึ้งถึงการปฏิบัติการทางด้านนี้ ซึ่งจะมีผลต่อการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นใช้เอง และขณะเดียวกันยังไม่ปรากฏชัดว่ามีผู้ใดนำเข้ามาศึกษาอย่างจริงจัง

2. โปรแกรมเบลท์-5 เป็นโปรแกรมที่ย่างอิตาเลี่ยนเขียนขึ้น คำอธิบายในโปรแกรมลิสติ้ง จึงเป็นภาษาอิตาเลี่ยน จึงมีอุปสรรคในการแปลความหมายคำอธิบายในลิสติ้งบ้าง

3. โปรแกรมเบลท์-5 เป็นโปรแกรมที่ใช้ไดนามิคโปรแกรมมิ่งของเบลล์มานในการแก้ปัญหา ซึ่งไดนามิคโปรแกรมมิ่งเป็นวิธีการแก้ปัญหาที่ลึกซับซ้อนมาก ผู้ที่จะเข้าใจลึกซึ้งจะต้องมีพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ดีพอสมควร

4. ในโปรแกรมเบลท์-5 ได้กำหนด data set reference number ดังนี้ READ = 5, WRITE = 6 และ data set reference number ของจานแม่เหล็กหรือ

DEPARTMENT OF NUCLEAR TECHNOLOGY

FORTRAN CODING FORM

NAME

DATE PAGE OF

ตารางที่ 3.7-1 JECL ที่ใช้กับเครื่อง IBM 370/138 ระบบ DOS

```
*  $JOB JNM=ABKBAC51,CLASS=N
// JOB  ABKBAC
// OPTION LINK
// EXEC FORTRAN
        }FORTRAN PROGRAM
/*
// EXEC ASSEMBLY
    ASSEMBLER PROGRAM FOR IAND,IOR,ICOMPL
/*
// EXEC LNKEDT
// ASSGN SYS004,DISK,VOL=CUWRK1,SHR
// DLBL IJSYS04,,0,SD
// EXTENT SYS004,CUWRK1,,,3600,240
// ASSGN SYS005,DISK,VOL=CUWRK1,SHR
// DLBL IJSYS05,,0,SD
// EXTENT SYS005,CUWRK1,,,3840,240
// ASSGN SYS006,DISK,VOL=CUWRK1,SHR
// DLBL IJSYS06,,0,SD
// EXTENT,SYS006,CUWRK1,,,4060,240
// ASSGN SYS002,X'00C'
// ASSGN SYS003,X'00E'
// EXEC
```

THREE TIMES FOR
1. IAND FUNCTION
2. IOR FUNCTION
3. ICOMPL FUNCTION

DEPARTMENT OF NUCLEAR TECHNOLOGY

FORTRAN CODING FORM

NAME

DATE PAGE OF

ตารางที่ 3.7-1(ต่อ)

ตารางที่ 3.7-2 JECL ที่ใช้กับเครื่องIBM 370/3031 ระบบ OS

```
//          EXEC FTGCLG,ID=ID,BCD=EBCDIC
//GO.FT02F001  DD UNIT=SYSSQ,DISP=(NEW,DELETE),SPACE=(CYL,(150,5)),
//            DCB=(RECFM=VS,LRECL=7280,BLKSIZE=7284)
//GO.FT03F001  DD UNIT=SYSSQ,DISP=(NEW,DELETE),SPACE=(CYL,(10,5)),
//            DCB=(RECFM=VS,LRECL=7280,BLKSIZE=7284)
//GO.FT04F001  DD UNIT=SYSSQ,DISP=(NEW,DELETE),SPACE=(CYL,(10,5)),
//            DCB=(RECFM=VS,LRECL=7280,BLKSIZE=7284)
//GO.SYSIN     DD DSN=&&DATA,DISP=(OLD,DELETE)
```

ดรัม = 2, 3, 4 และควบคุมคำสั่งด้วยระบบ OS (Operating System) แต่เครื่องคอมพิว-เตอร์ของสถาบันบริการคอมพิวเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ควบคุมคำสั่งด้วยระบบ DOS "Disk Operating System" โดยใช้จานแม่เหล็กเป็นเครื่องทดหน่วยความจำ ได้กำหนด READ = 1, CARD PUNCH = 2, WRITE = 3 ดังนี้ data set reference number จึงไม่ตรงกัน ซึ่ง READ, WRITE ที่แก้ไขเพื่อให้ตรงกับในโปรแกรมนั้น สามารถกำหนดการแก้ไขขั้นที่ JECL ดังแสดงใน Coding Form ตารางที่ 3.6-1 คือ

```
ASSGN SYS002, X'00C'                    (READ)
ASSGN SYS002, X'00E'                    (WRITE)
```

สำหรับ data set reference nember ของจานแม่เหล็ก โปรแกรมได้กำหนดไว้ใน Block data ที่ตัวแปร "MFHA" (บัตรเลขที่ BES0263) จึงต้องแก้ไขโปรแกรม ให้ค่าตัวแปร MFHA = 7, 8, 9

สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ของศูนย์ประมวลผลด้วยเครื่องจักรแห่งประเทศไทย สำนักงานสถิติแห่งชาตินั้น ควบคุมคำสั่งด้วยระบบ OS อยู่แล้ว จึงใช้ JECL ของเดิมได้เลย ไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงภายในโปรแกรม

5. โปรแกรมเบสท์-5 เป็นโปรแกรมที่ใช้ในต่างประเทศ ถึงแม้เขียนเป็นภาษาโฟร์-แทรน IV แต่ก็มีบางส่วนใช้ภาษาโฟรแทรน V ซึ่งมี Logic ที่ซับซ้อนขึ้น ดังที่ใช้ในการ Packing เป็นต้น ซึ่ง Logic ดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปของบลูลีนฟังก์ชั่น (Boolean Function) ซึ่งปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่ปรากฏชัดว่ามีผู้รู้ภาษาโฟร์แทรน V และการเขียนโปรแกรมแสดงบูลลีน-ฟังก์ชั่น จากการติดต่อไปยังต่างประเทศได้รับความช่วยเหลือจาก Dr. Enrico Sartori IAEA OFFICER, NEADD, NEA DATA BANK แห่งประเทศฝรั่งเศส ได้กรุณาช่วยจัดส่งโปรแกรมบูลลีนฟังก์ชั่น IAND, IOR และ ICOMPL มาให้ในรูปภาษาโฟร์แทรน แต่เนื่องจากคอมไพเลอร์ในประเทศไทยไม่สามารถแปลคำสั่งฟังก์ชั่น ICOMPL เป็นค่าที่ถูกต้อง ซึ่งเป็นที่สงสัยตั้งแต่ต้นแล้วแต่ไม่สามารถยืนยันได้ จึงเกิดการคำนวณผิดพลาดขึ้น และการผิดพลาดนี้เป็นการ overfolw ซึ่งไปพ้อง-กับการผิดพลาดในการกำหนดพารามิเตอร์ที่ไม่ถูกต้อง จึงทำให้เกิดการหลงทางฟักใหญ่ ต่อมาจึงได้-

DEPARTMENT OF NUCLEAR TECHNOLOGY

FORTRAN CODING FORM

NAME

DATE PAGE OF

ตารางที่ 3.8-1 โปรแกรมมูลลีนฟังก์ชั่นภาษาโฟร์แทรน

```
      FUNCTION IAND(I,J)
      CALL AND(I,J,IAND)
      RETURN
      ENTRY IOR(I,J)
      CALL OR(I,J,IOR)
      RETURN
      ENTRY ICOMPL(I)
      CALL COMPL(I,ICOMPL)
      RETURN
      END
      SUBROUTINE AND(I,J,IAND)
      LOGICAL I,J,IAND,IOR,ICOMPL
      IAND=I.AND.J
      RETURN
      ENTRY OR(I,J,IOR)
      IOR=I.OR.J
      RETURN
      ENTRY COMPL(I,ICOMPL)
      ICOMPL=.NOT.I
      RETURN
      END
```

DEPARTMENT OF NUCLEAR TECHNOLOGY

FORTRAN CODING FORM

NAME

DATE PAGE OF

ตารางที่ 3.8-2 โปรแกรมบูลลีนฟังก์ชั่นภาษาแอสเซมเบลอร์

COMM	Statement No.	CONT	FORTRAN STATEMENT	SERIAL NUMBER
			1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80	
	IAND		START 0 IAND(ARG1, ARG2) AND, FIXED POINT RETURN	1
			USING *,15	2
			ENTRY AND	3
			MVI WHICH+1,X'F0' SET TO BRANCH AT WHICH	4
			LA 15,AND-IAND(15)	5
			USING AND,15	6
			B MERGE	7
	AND		MVI WHICH+1,X'00' AND(ARG1, ARG2) AND, FLOAT. POINT RETURN	8
	MERGE		ST 2,PASS SAVE X2 IN PASS	9
			LM 1,2,0(1) X1=ADD. ARG1 X2=ADD. ARG2	10
			L 0,0(0,1) X0=FIRST ARG.	11
			N 0,0(0,2) AND SECOND ARG. AGAINST X0	12
			L 2,PASS RESTORE X2 FROM PASS	13
	WHICH		B DONE	14
			ST 0,PASS	15
			LE 0,PASS	16
	DONE		BR 14	17
	PASS		DS F	18
			END	19
				20
	IOR		START 0 IOR(ARG1, ARG2) IN OR, FIXED POINT RETURN	21
			USING *,15	22
			ENTRY OR	23
			MVI WHICH+1,X'F0' SET TO BRANCH AT WHICH	24
			LA 15,OR-IOR(15)	25
			1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80	

DEPARTMENT OF NUCLEAR TECHNOLOGY

FORTRAN CODING FORM

NAME

DATE PAGE OF

ตารางที่ 3.8-2 (ต่อ)

```
                USING OR,15
                BE    MERGE
OR     MVI   I  WHICH+1,X'00'      OR(ARG1,ARG2)    IN OR FLOAT. POINT RETURN
MERGE          ST    2,PASS        SAVE X2 IN PASS
               LM    1,2,0(1)      X1=ADD. ARG1  X2=ADD. ARG2
               L     0,0(0,1)      X0=FIRST ARG.
               O     0,0(0,2)      INC OR SECOND ARG. AGAINST X0
               L     2,PASS        RESTORE X2 FROM PASS
WHICH          B     DONE
               ST    0,PASS
               LE    0,PASS
DONE           BR    14
PASS           DS    F
               END

ICOMPL         START 0          ICOMPL(ARG1)          COMP, FIXED POINT RETURN
               USING *,15
               ENTRY COMPL
               MVI   WHICH+1,X'F0'        SET TO BRANCH AT WHICH
               LA    15,COMPL-ICOMPL(15)
               USING COMPL,15
               BE    MERGE
COMPL          MVI   WHICH+1,X'00'        COMPL(ARG1)    COMPL, FLO. PT. RETURN
MERGE          L     1,0(0,1)             X1=ADD. OF FIRST ARG.
               L     0,0(0,1)             X0=FIRST ARG.
```

DEPARTMENT OF NUCLEAR TECHNOLOGY

FORTRAN CODING FORM

NAME

DATE PAGE OF

ตารางที่ 3.8-2 (ต่อ)

COMM	Statement No.	CONT	FORTRAN STATEMENT	SERIAL NUMBER
			X 0,MASK COMPLEMENT X0	
	WHICH		B DONE	
			ST 0,PASS	
			LE 0,PASS	
	DONE		BR 14	
	PASS		DS F	
	MASK		DC F'-1' MASK IS ALL 1	
			END	

วกกลับมาที่จุดส่งสัยเดิมคือ ฟังก์ชั่น ICOMPL และได้ติดต่อไปทาง Dr. Sartori อีกครั้งหนึ่ง ปรากฏว่าทาง Dr. Sartori ให้ความส่งสัยที่จุดเดียวกัน และตั้งข้อสังเกตโปรแกรมที่ส่งมาให้นี้ขึ้นอยู่กับชนิดคอมไพเล่อร์จึงได้กรุณาจัดส่งโปรแกรมบูลลีนฟังก์ชั่น IAND, IOR, ICOMPL ภาษาแอล่เซมเบลอร์มาให้อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งภาษาแอล่เซมเบลอร์นี้เป็นภาษาที่ใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ทันทีไม่ขึ้นกับคอมไพเล่อร์ ซึ่งก็ปรากฏว่าหลังจากส่งเข้าไปคำนวณพร้อมกับโปรแกรมเบสท์-5 แล้วสามารถให้ค่าคำนวณที่ถูกต้อง

สำหรับโปรแกรม IAND, IOR และ ICOMPL ในภาษาโฟร์แทรนและภาษาแอล่เซมเบลอร์ ดังแล่ดงใน Coding Form ตารางที่ 3.8-1 และ 3.8-2 ตามลำดับ

สำหรับค่าเปรียบเทียบของ IAND, IOR และ ICOMPL ที่ได้จากการสันนิษฐาน โปรแกรมภาษาโฟร์แทรนและภาษาแอล่เซมเบลอร์นั้น ดังแล่ดงในตารางที่ 3.8-3

ตารางที่ 3.8-3 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชั่น IAND, IOR และ ICOMPL จากการสันนิษฐานโปรแกรมภาษาโฟร์แทรนและโปรแกรมภาษาแอล่เซมเบลอร์

ฟังก์ชั่น	ตัวเลขที่ใช้ในการทดลองเปรียบเทียบเลขฐาน 10 (เลขฐาน 2)	ค่าที่ได้จากการสันนิษฐานเลขฐาน 10 (เลขฐาน 2)	โปรแกรมภาษาโฟร์-แทรนเลขฐาน 10 (เลขฐาน 10)	โปรแกรมภาษาแอล่เซมเบลอร์ เลขฐาน 10 (เลขฐาน 2)
IAND	3(11), 6(110)	2(10)	2(10)	2(10)
IOR	3(11), 6(110)	7(111)	7(111)	7(111)
ICOMPL	3(11)	-4(-100)	2(10)	-4(-100)

แล่ดงว่าการสันนิษฐานนี้เดิมถูกต้อง และโปรแกรมบูลลีนฟังก์ชั่นภาษาโฟร์แทรนใช้ไม่ได้กับคอมไพเล่อร์ที่มีอยู่

6. โปรแกรมเบล์ท-5 ที่นำมาศึกษานี้จัดทำขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2517 ขอบเขตรูปแบบข้อมูลใช้ได้กับจำนวนตำแหน่งผลลัพธ์ที่ได้ในขณะนั้น แต่สำหรับการศึกษาวิเคราะห์ในครั้งนี้ ได้ให้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเริ่มเดินเครื่องผลิตไฟฟ้าในวันที่ 1 มกราคม คศ. 1990 (พ.ศ. 2533) ดังนั้นค่าขอบเขตรูปแบบข้อมูลจึงต้องขยายใหญ่ขึ้น สามารถบรรจุค่าผลลัพธ์ลงได้หมดเพื่อสอดคล้องกับราคาที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากค่าเงินเปลี่ยนตามกาลเวลา จึงได้แก้ไขบัตรเลขที่ BES 0687 จาก

T78, 9H $, F 10.0/

เป็น T78, 7H $, F 12.0/