เอกสารอ้างอิง

[1] สมบูรณ์ จงชัยกิจ, เอกสารประกอบคำบรรยาย เรื่อง การควบคุมแบบอัตโนมัติ และ การควบคุมแบบ PID, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

[2] Harold L. Wade, Regulatory and Advanced Regulatory Control : System Development, ISA, 1994.

[3] Karl J. Astrom and Bjorn Wittenmark, Computer Controlled System Theory and Design, Prentice Hall, Inc, 1984.

[4] Pedryc, W., Fuzzy Control and Fuzzy Systems, Reserch Studies Press Ltd., 1993.

[5] H.-J. Zimmermann, Fuzzy Set Theory and Its Applications, Kluwer Academic Publishers, 1991.

[6] Arnold Kaufmann, Madan M. Gupta, Introduction to Fuzzy Arithmetic, Van Nostrand Reinhold Company Inc, 1985.

[7] Dubois, D. and Prade, H., Possibiliity Theory : An Approach to Computerized Processing Uncertainty, New York : Plenum Press, 1988.

[8] Yager, R.R., Ovchinnikov, S., Tong, R.M. , Nguyen, H.T., eds, Fuzzy Sets and Applications : Selected Papers by L.A. Zadeh, New York : Wiley-Interscience, 1987.

[9] Lee, C.C., Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller Part I, IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics., Vol 20, No. 2, pp 404-418, 1990.

[10] ________., Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller Part II, IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics., Vol 20, No. 2, pp 419-435, 1990.

[11] Wang, L.X., Adaptive Fuzzy Systems and Control Design And Stability Analysis, New Jersey : Prentice-Hall, 1994.

[12] Hyeong-Pyo Hong, Suk-Joon Park, Sang-Joon Han, Kyeong-Young Cho, Young-Chul lim, Jong-Kun Park, Tae-Gon Kim, A Design of Auto-Tuning PID Controller Using Fuzzy Logic, Proceedings of the 1992 International Conference on Industrial Electronics., Control, Instrumentation, and Automation. Power Electronics and Motion Control, Vol.2, pp.971-976, 1992.

[13] Zhen-Yu Zhao, Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers, IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol.23,no.5,pp.1392-1398, 1993.

[14] Gregory K. McMillan, Tuning and Control Loop Performance, ISA, 1983.

[15] F.G. Shinskey, Process Control Systems : Appication,Design and Tuning, McGraw-hill, 1988.

[16] George Stephanopoulos, Chemical Process Control : An Introduction to Theory and Practice, Prentice Hall Inc., 1984.

[17] F.G. Shinskey, Feedback Controller for the Process Industries, McGraw-hill, 1994.

[18] Katsuhiko Ogata, Modern Control Engineering, Prentice Hall Inc., 1987.

ภาคผนวก ก.

ตัวอย่างการคำนวณ

ก) ตรวจสอบ Product-operation Rule of Fuzzy Implication [10],[11] ใน GMP โดยตั้งสมมติฐานว่าฟัซซีเซต A เป็นฟัซซีเซตปกติ

1. กรณี A'=A เราจะได้

$$\mu_{B'}(v) = \sup_{u \in U} [\min\{\mu_A(u)\mu_B(v), \mu_A(u)\}]$$

$$= \sup_{u \in U} [\mu_A(u)\mu_B(v)]$$

$$= \mu_B(v)$$

2. กรณี A' = very A เราจะได้

$$\mu_{B'}(v) = \sup_{u \in U} [\min\{\mu_A(u)\mu_B(v), \mu_A 2(u)\}]$$

$$= \mu_B(v)$$

3. กรณี A' = more or less A เราจะได้

$$\mu_{B'}(v) = \sup_{u \in U} [\min\{\mu_A(u)\mu_B(v), \mu_A 1/2(u)\}]$$

$$= \mu_B(v)$$

4. กรณี A' = $\overline{A}$ เราจะได้

$$\mu_{B'}(v) = \sup_{u \in U} [\min\{\mu_A(u)\mu_B(v), 1-\mu_A(u)\}]$$

$$= \frac{\mu_B(v)}{1+\mu_B(v)}$$

ข) ตรวจสอบ Product-operation rule of fuzzy implication [10],[11] ใน GMT โดยสมมติว่า ฟัซซีเซต B เป็นฟัซซีเซตปกติ

1. กรณี B'=B เราจะได้

$$\mu_{A'}(v) = \sup_{v \in V} [\min\{\mu_A(u)\mu_B(v), 1-\mu_B(u)\}]$$

$$= \frac{\mu_A(u)}{1+\mu_A(u)}$$

2. กรณี B' = very B เราจะได้

$$\mu_{B'}(v) = \sup_{v \in V} [\min\{\mu_A(u)\mu_B(v), 1-\mu_A 2(u)\}]$$

$$= \frac{\mu_A(u)\sqrt{\mu_A 2(u)+4-\mu_A 2(u)}}{2}$$

3. กรณี A' = more or less A เราจะได้

$$\mu_{B'}(v) = \sup_{v \in V} [\min\{\mu_A(u)\mu_B(v), 1-\mu_B 1/2(u)\}]$$

$$= \frac{1+2\,\mu_A(u)-\sqrt{1+4\mu_A(u)}}{2\mu_A(u)}$$

4. กรณี A' = $\bar{A}$ เราจะได้

$$\mu_{B'}(v) = \sup_{v \in V} [\min\{\mu_A(u)\mu_B(v), 1-\mu_B(u)\}]$$

$$= \mu_A(u)$$

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณสำหรับความสัมพันธ์ฟัซซีรูปแบบต่าง ๆ ถูกสรุปอยู่ใน ตารางที่ ก.1 และ ก.2 สำหรับ GMP และ GMT ตามลำดับ

ตารางที่ ก.1 ผลลัพธ์ของการให้เหตุผลแบบ GMP สำหรับฟัซซีอิมพลีเคชันฟังก์ชันแบบต่าง ๆ

	A	Very A	More or Less A	Not A
Rc	μ_B	μ_B	μ_B	$0.5 \wedge \mu_B$
Rp	μ_B	μ_B	μ_B	$\frac{\mu_B}{1+\mu_B}$
Ra	$\frac{1+\mu_B}{2}$	$\frac{3+2\mu_B-\sqrt{5+4\mu_B}}{2}$	$\frac{\sqrt{5+4\mu_B}-1}{2}$	1
Rm	$0.5 \vee \mu_B$	$\frac{3-\sqrt{5}}{2} \vee \mu_B$	$\frac{\sqrt{5}-1}{2} \vee \mu_B$	1
Rb	$0.5 \vee \mu_B$	$\frac{3-\sqrt{5}}{2} \vee \mu_B$	$\frac{\sqrt{5}-1}{2} \vee \mu_B$	1
Rs	μ_B	μ_B^2	$\sqrt{\mu_B}$	1
RΔ	$\sqrt{\mu_B}$	$(\mu_B)^{2/3}$	$(\mu_B)^{1/3}$	1

ตารางที่ ก.2 ผลลัพธ์ของการให้เหตุผลแบบ GMT สำหรับฟัซซีอิมพลีเคชันฟังก์ชันแบบต่าง ๆ

	B	Very B	More or Less B	B
Rc	$0.5 \wedge \mu_A$	$\frac{\sqrt{5}-1}{2} \wedge \mu_A$	$\frac{3-\sqrt{5}}{2} \wedge \mu_A$	μ_A
Rp	$\frac{\mu_A}{1+\mu_A}$	$\frac{\mu_A\sqrt{\mu_A^2+4}-\mu_A^2}{2}$	$\frac{2\mu_A+1-\sqrt{4\mu_A+1}}{2\mu_A}$	μ_A
Ra	$-\frac{\mu_A}{2}$	$\frac{1-2\mu_A+\sqrt{1+4\mu_A}}{2}$	$\frac{3-\sqrt{1+\mu_A}}{2}$	1
Rm	$0.5 \vee (1-\mu_A)$	$(1-\mu_A) \vee \left(\frac{\sqrt{5}-1}{2} \vee \mu_A\right)$	$\frac{3-\sqrt{5}}{2} \vee (1-\mu_A)$	1
Rb	$0.5 \vee (1-\mu_A)$	$\frac{\sqrt{5}-1}{2} \vee (1-\mu_A)$	$\frac{3-\sqrt{5}}{2} \vee (1-\mu_A)$	1
Rs	$-\mu_A$	$-\mu_A^2$	$-\sqrt{\mu_A}$	1
RΔ	$\frac{1}{1+\mu_A}$	$\frac{\sqrt{1+4\mu_A^2-1}}{2\mu_A^2}$	$\frac{2+\mu_A-\sqrt{\mu_A^2+4\mu_A}}{2}$	1

ภาคผนวก ข.

หัวข้อที่ 1 เป็นการพิสูจน์ให้เห็นว่าการนิรนัยหาผลลัพธ์จาก ฐานกฎซึ่งเป็นชุดของประโยคเงื่อนไขย่อย ๆ มารวมกัน นอกจากการนิรนัยจากฐานกฎรวมเพียงครั้งเดียวแล้วเราอาจทำได้โดยการหาผลลัพธ์จากประโยคเงื่อนไขย่อย ๆ ทีละประโยคแล้วค่อยรวมผลลัพธ์ที่ได้เข้าด้วยกัน ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกมากกว่า

หัวข้อที่ 2 เป็นการพิสูจน์ให้เห็นว่าสำหรับกรณีพิเศษที่ใช้กฎการนิรนัยเป็น Rc, Rp, Rbp (Bounded Product) หรือ Rdp (Drastic Product) นั้นเราสามารถคิดผลเนื่องจากตัวแปรขาเข้าทีละตัวแล้วจึงรวมผลเนื่องจากตัวแปรขาเข้าแต่ละตัวนั้นเข้าด้วยกันเป็นผลลัพธ์รวมสำหรับประโยคเงื่อนไขย่อย ๆ ก็ได้

หัวข้อที่ 3 เป็นการพิจารณากรณีพิเศษที่ข้อมูลขาเข้าเป็นฟัซซีซิงเกิลตัน ซึ่งจะทำให้การนิรนัยทำได้ง่ายยิ่งขึ้นไปอีก โดยการใช้แนวความคิดของตัวประกอบน้ำหนักในการนิรนัย

1) $(A^{1'}, A^{2'}) \circ \bigcup_{i=1}^{n} R_i = \bigcup_{i=1}^{n} (A^{1'}, A^{2'}) \circ R_i$

พิสูจน์ :

$$
\begin{aligned}
B' &= (A^{1'}, A^{2'}) \circ \bigcup_{i=1}^{n} R_i \\
&= (A^{1'}, A^{2'}) \circ \bigcup_{i=1}^{n} (A_i^1 \, AND \, A_i^2 \rightarrow B_i)
\end{aligned}
$$

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก $\mu_{B'}$ ของฟัซซีเซต B' ถูกนิยามสำหรับทุกค่า $v \in V$ โดย

$$
\begin{aligned}
\mu_{B'}(v) &= \left(\mu_{A^{1'}}(u^2), \mu_{A^{2'}}(u^2)\right) \circ \max\left\{\mu_{R_1}(u^1, u^2, v),\right. \\
&\qquad \left.\mu_{R_2}(u^1, u^2, v), \ldots, \mu_{R_n}(u^1, u^2, v)\right\} \\
&= \sup_{u^1, u^2} \min\left\{\left(\mu_{A^{1'}}(u^1), \mu_{A^{2'}}(u^2)\right), \max\left\{\mu_{R_1}(u^1, u^2, v),\right.\right. \\
&\qquad \left.\left.\mu_{R}(u^1, u^2, v), \ldots, \mu_{R_n}(u^1, u^2, v)\right\}\right\} \\
&= \sup_{u^1, u^2} \max\left\{\min\left\{\left(\mu_{A^{1'}}(u^1), \mu_{A^{2'}}(u^2)\right), \mu_{R_1}(u^1, u^2, v)\right\}, \ldots\right.
\end{aligned}
$$

$$\min\left\{\left(\mu_{A^{1\prime}}(u^1), \mu_{A^{2\prime}} u^2)\right), \mu_{R_n}(u^1,u^2,v)\right\}\}$$

$$= \max\left\{\left[\left(\mu_{A^{1\prime}},(u^1), \mu_{A^{2\prime}},(u^2)\right) \circ \mu_{R_1}(u^1,u^2,v)\right], \ldots \left[\left(\mu_{A^{1\prime}}(u^1), \mu_{A^{2\prime}}(u^2)\right)_{\circ} \mu_{R_n}(u^1,u^2,v)\right]\right\}$$

ดังนั้น

$$B' = \left[\left(A^{1\prime}, A^{2\prime}\right)\circ R_1\right] \cup \left[\left(A^{1\prime}, A^{2\prime}\right)\circ R_2\right] \cup \ldots \cup \left[\left(A^{1\prime}, A^{2\prime}\right)\circ R^n\right]$$
$$= \bigcup_{i=1}^{n} (A^{1\prime}, A^{2\prime})\circ R_i$$
$$= \bigcup_{i=1}^{n} (A^{1\prime}, A^{2\prime})\circ (A_i^1 AND A_i^2 \rightarrow B_i)$$
$$= \bigcup_{i=1}^{n} B_i'$$

2) สำหรับฟัซซีคอนจังชันที่กำหนดโดย Rc, Rp, Rbp, และ Rdp เราจะได้

$$(A^{1\prime}, A^{2\prime})\circ (A_i^1 AND A_i^2 \rightarrow B_i)$$
$$= \left[A^{1\prime}\circ\left[A_i^1 \rightarrow B_i\right]\right] \cap \left[A^{2\prime}\circ\left(A_i^2 \rightarrow B_i\right)\right] if \mu_{A_i^1 \times A_i^2} = \mu_{A_i^1} \wedge \mu_{A_i^2}$$

$$(A^{1\prime}, A^{2\prime})\circ (A_i^1 AND A_i^2 \rightarrow B_i)$$
$$= \left[A^{1\prime}\circ (A_i^1 \rightarrow B_i)\right]\left[A^{2\prime}\circ\left(A_i^2 \rightarrow B_i\right)\right] if \mu_{A_i^1 \times A_i^2} = \mu_{A_i^1} \cdot \mu_{A_i^2}$$

3) ถ้าข้อมูลเข้าเป็นฟัซซีซิงเกิลตัน คือ $A^{1\cdot} = u_o^{\ 1}$ และ $A^{2,} = u_o^{\ 2}$ ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้โดยการใช้ Minimum-Operation Rc, และ Product-operation Rp จะแสดงได้ดังนี้คือ

Rc : $\alpha_I^{\wedge} \wedge \mu_{Bi}(v)$ Rc : $\alpha_I^{\circ} \wedge \mu_{Bi}(v)$

1 2

Rp : $\alpha_i^{\wedge} . \mu_{Bi}(v)$ Rc : $\alpha_I^{\circ} . \mu_{Bi}(v)$

โดย $\alpha_i^{\wedge} = \mu_{A_i^1}(u_o^1) \wedge \mu_{A_i^2}(u_0^2)$ และ $\alpha^{\circ} = \mu_{A_i^1}(u_o^1).\, \mu_{A_i^2}(u_0^2)$

พิสูจน์ :

1) $B_i' = \left[A^{1\prime}\circ\left(A_i^1 \rightarrow B_i\right)\right] \cap \left[A^{2\prime}\circ\left(A_i^2 \rightarrow B_i\right)\right]$

$$\mu_{B_i'} = \min\left\{\left[\mu_0^1\circ\left(\mu_{A_i^1}(u^1) \rightarrow \mu_{B_i}(v)\right)\right], \left[\mu_0^2\circ\left(\mu_{A_i^2}(u^2) \rightarrow \mu_{B_i}(v)\right)\right]\right\}$$
$$= \min\left\{\left[\mu_A^1(u_0^1) \rightarrow \mu_{B_i}(v)\right], \left[\left(\mu_{A_i^2}(u^2) \rightarrow \mu_{B_i}(v)\right)\right]\right\}$$

2) $B_i' = \left[A^{1'}\circ\left(A_i^1 \rightarrow B_i\right)\right] \cap \left[A^{2'}\circ\left(A_i^2 \rightarrow B_i\right)\right]$

$$\mu_{B_i'} = \min\left\{\left[\mu_0^1\circ\left(\mu_{A_i^1}(u^1) \rightarrow \mu_{B_i}(v)\right)\right],\left[\mu_0^2\circ\left(\mu_{A_i^2}(u^2) \rightarrow \mu_{B_i}(v)\right)\right]\right\}$$
$$= \left\{\left[\mu_A^1(u_0^1) \rightarrow \mu_{B_i}(v)\right].\left[\left(\mu_{A_i^2}(u^2) \rightarrow \mu_{B_i}(v)\right)\right]\right\}$$

ผลลัพธ์อันนี้นอกจากจะทำให้การคำนวณทำได้ง่ายขึ้นแล้วยังให้เราสามารถตีความโดยการใช้รูปภาพของกลไกการอิงความจริงอีกด้วย

สำหรับกรณีตัวดำเนินการแบบซูปรีมัม-โปรดักท์ (Sup-Product) เราจะได้

1) $(A^{1'}, A^{2'})\bullet \bigcup_{i=1}^{n} R_i = \bigcup_{i=1}^{n} (A^{1'}, A^{2'})\bullet R_i$

2) สำหรับฟัซซีคอนจังชันที่กำหนดโดย Rc,Rp,Rbp และ Rdp เราจะได้

$$(A^{1'}, A^{2'})\bullet(A_i^1 AND A_i^2 \rightarrow B_i)$$
$$= \left[A^{1'}\bullet\left[A_i^1 \rightarrow B_i\right]\right] \cap \left[A^{2'}\bullet\left(A_i^2 \rightarrow B_i\right)\right] if \mu_{A_i^1 \times A_i^2} = \mu_{A_i^1} \wedge \mu_{A_i^2}$$

$$(A^{1'}, A^{2'})\bullet(A_i^1 AND A_i^2 \rightarrow B_i)$$
$$= \left[A^{1'}\bullet(A_i^1 \rightarrow B_i)\right]\left[A^{2'}\bullet\left(A_i^2 \rightarrow B_i\right)\right] if \mu_{A_i^1 \times A_i^2} = \mu_{A_i^1} \cdot \mu_{A_i^2}$$

3) ถ้าข้อมูลเข้าเป็นฟัซซีซิงเกิลตัน คือ $A^{1.} = u_o^1$ และ $A^{2.} = u_o^2$ ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้โดยการใช้ Minimum-Operation Rc, และ Product-operation Rp จะแสดงได้ดังนี้คือ

Rc : $\alpha_I^{\wedge} \wedge \mu_{Bi}(v)$ Rc : $\alpha_I^{\bullet} \wedge \mu_{Bi}(v)$

1   2

Rp : $\alpha_i^{\wedge} . \mu_{Bi}(v)$ Rc : $\alpha_I^{\bullet} . \mu_{Bi}(v)$

โดย $\alpha_i^{\wedge} = \mu_{A_i^1}(u_o^1) \wedge \mu_{A_i^2}(u_0^2)$ และ $\alpha_i^{\bullet} = \mu_{A_i^1}(u_o^1) . \mu_{A_i^2}(u_0^2)$

ดังนั้นเราอาจกล่าวโดยทั่วไปได้ว่า ถ้าข้อมูลขาเข้าเป็นฟัซซีซิงเกิลตันแล้ว (สำหรับกฎการนิรนัยแบบ Rc, และ Rp)

$$Rc: \mu_{B'} \bigcup_{i=1}^{n} \alpha_i \wedge \mu_{B_i}$$

$$Rp: \mu_{B'} \bigcup_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot \mu_{B_i}$$

ตัวประกอบน้ำหนัก (Weighting Factor) α_I เป็นค่าที่บอกให้รู้ว่าประโยคเงื่อนไขที่ I มีส่วนร่วมในผลลัพธ์รวมมากน้อยเพียงใด ตัวประกอบน้ำหนักอาจหามาได้สองวิธี คือ วิธีแรกโดยการใช้ตัวดำเนินการอินเตอร์เซคชันเป็นตัวเชื่อมประโยค AND และวิธีที่สองใช้ผลคูณพีชคณิตเป็นตัวเชื่อมประโยค AND ซึ่งในกรณีหลังผลลัพธ์รวมจะได้รับผลจากตัวแปรขาเข้าทุกตัว

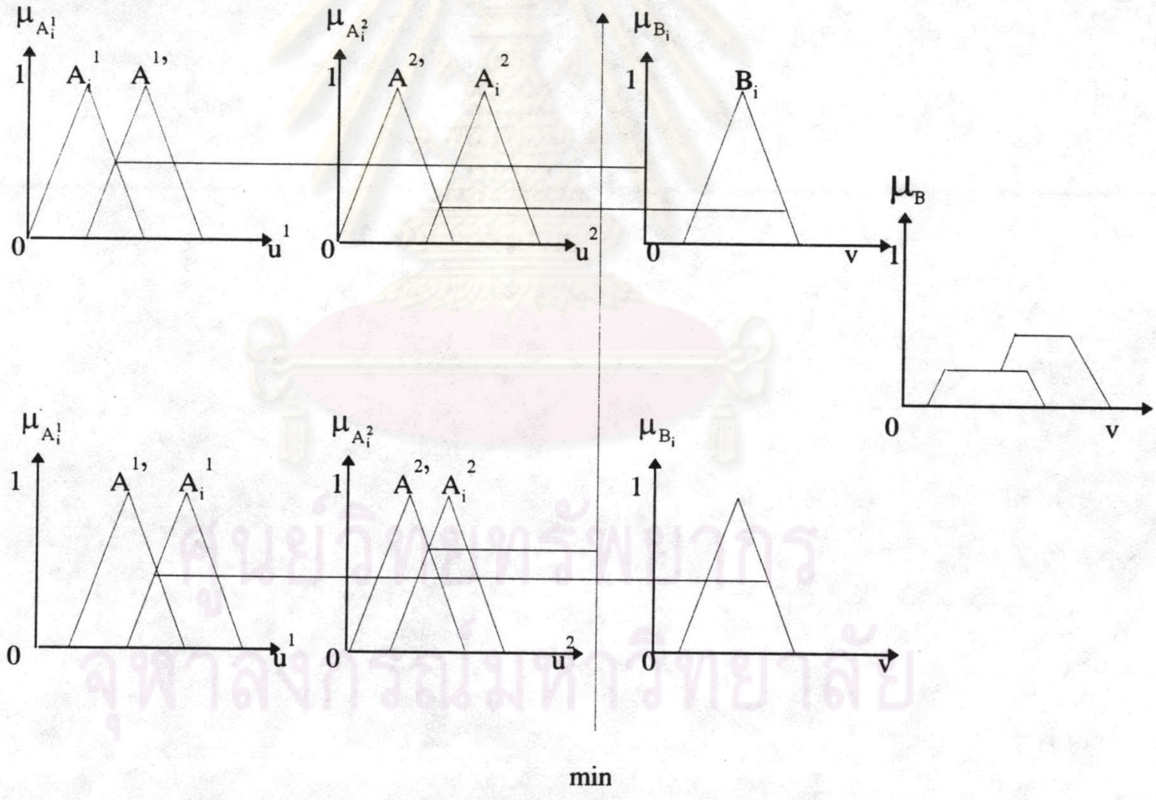
($\alpha_i = \prod_{k=1}^{p} \mu_{A_i^k}(u^k)$) แทนที่จะได้รับผลจากตัวที่เด่นเพียงตัวเด่นเพียงตัวเดียวในตัวดำเนินการอินเตอร์เซคชัน $\alpha_i = \min_k \left\{ \mu_{A_i^k}(u^k) \right\}$)

เพื่อความง่ายเราสมมติว่ามีประโยคเงื่อนไขสองประโยค คือ

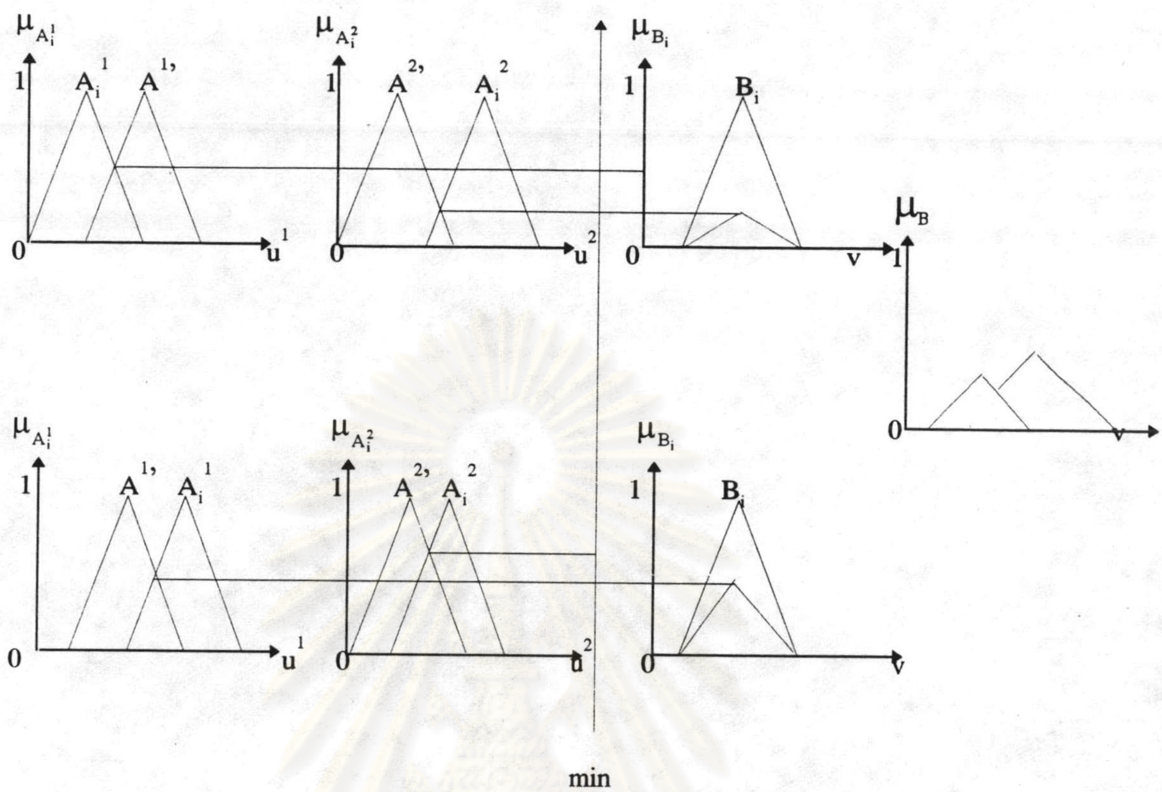
R_1 : IF u^1 is A_1^1 AND u^2 is A_1^2 THEN v is B_1

R_2 : IF u^1 is A_2^1 AND u^2 is A_2^2 THEN v is B_2

รูปที่ ข.1 และ ข.2 แสดงการให้เหตุผลโดยประมาณ โดยการใช้กฎการนิรนัยแบบ Rc และ Rp ใช้ตัวดำเนินการอินเตอร์เซคชันเป็นตัวเชื่อมประโยค AND และใช้ตัวดำเนินการยูเนียนเป็นตัวเชื่อมประโยค ALSO การนิรนัย หรือ การสรุปผลลัพธ์จากฟัซซีเซตของข้อมูลขาเข้าที่สามารถแสดงให้เข้าใจได้โดยรูปภาพ



รูปที่ ข.1 การให้เหตุผลโดยการใช้ $\alpha^{\wedge}$ และ Rc



รูปที่ ข.2 การให้เหตุผลโดยการใช้ $\alpha^{\bullet}$ และ Rc

ในกระบวนการออนไลน์ (On-line process) สภาวะของระบบควบคุมมีบทบาทมากในการควบคุมข้อมูลขาเข้ามักอยู่ในรูปของสัญญาณที่วัดมาจากอุปกรณ์เซนเซอร์ โดยอยู่ในรูปของค่าตายตัว (Crisp Value) เราต้องแปลงค่าตายตัวดังกล่าวให้เป็นฟัซซีเซตเพื่อสามารถนำไปวินิจฉัยหาการควบคุมที่เหมาะสม ในบางกรณีเราจะแปลงข้อมูลขาเข้าดังกล่าวให้เป็นฟัซซีซิงเกิลตัน ซึ่งการนิรนัยหาผลลัพธ์จะทำได้ตามหัวข้อ 3 โดยตัวประกอบน้ำหนักในกรณีนี้จะเป็น

$$\alpha_1 = \mu_{A_1^1}(u_0^1) \wedge \mu_{A_1^2}(u_0^2)$$

$$\alpha_2 = \mu_{A_2^1}(u_0^1) \wedge \mu_{A_2^2}(u_0^2)$$

ค่าตัวประกอบน้ำหนักดังกล่าวจะถูกใช้ในการนิรนัยหาผลลัพธ์ซึ่งมีแบบที่นิยมใช้กัน 4 ชนิดด้วยกันคือ

1) การให้เหตุผลฟัซซีโดยการใช้ Minimum-Operation Rule (Rc) เป็นฟัซซิอิมพลิเคชันฟังก์ชัน ในการให้เหตุผลแบบนี้กฎข้อที่ i จะให้การควบคุมเป็น

$$\mu_{B_i'}(v) = \alpha_1 \wedge \mu_{B_i}(v)$$

ซึ่งหมายความว่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก μ_B ของผลลัพธ์ในรูปของฟัซซีเซต B มีนิยามทุกจุดต่าง ๆ เป็น

$$\mu_B(v) = \mu_{B_1'} \vee \mu_{B_2'}$$
$$= \left[\alpha_1 \wedge \mu_{B_1}(v)\right] \vee \left[\alpha_2 \wedge \mu_{B2}(v)\right]$$

2) การให้เหตุผลฟัซซีโดยการใช้ Product - Operation Rule เป็นฟัซซีอิมพลีเคชันฟังก์ชันในกรณีนี้กฎข้อที่ i จะให้การควบคุมเป็น

$$\mu_{B_i'}(v) = \alpha_i \cdot \mu_{B_1}(v)$$

ซึ่งหมายความว่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก μ_B ของผลลัพธ์ที่ได้ B มีนิยามจุดต่อจุดเป็น

$$\mu_{B'}(v) = \mu_{B_1'} \vee \mu_{B_2'}$$
$$= \left[\alpha_1 \cdot \mu_{B_1}(v)\right] \vee \left[\alpha_2 \wedge \mu_{B_2}(v)\right]$$

3) การให้เหตุผลฟัซซีโดยวิธีของ Tsukamoto โดยการใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นฟังก์ชันแบบทางเดียว (Monotonic Function) วิธีนี้เสนอโดย Tsukamoto โดยกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ A_i^1, A_i^2 และ B_i ให้เป็นฟังก์ชันทางเดียว (ฟังก์ชันเพิ่มหรือฟังก์ชันลด) อย่างไรก็ตาม ในกรณีการใช้ในงานการควบคุมกระบวนการเราเพียงแต่บังคับให้ B_i เท่านั้นที่จำเป็นต้องเป็นฟังก์ชันทางเดียว

ในวิธีของ Tsukamoto ผลลัพธ์ที่ได้จากกฎแรกคือ α_1 ซึ่ง $\alpha_1 = C_1(v_1)$ ผลลัพธ์ที่ได้จากกฎข้อที่สอง α_2 ซึ่งทำให้ $\alpha_2 = C_2(v_2)$ โดยการควบคุมสามารถแสดงได้โดยผลรวมแบบคิดน้ำหนัก (Weighted Combination) ดังนี้

$$Z_o = \frac{\alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

4) การให้เหตุผลโดยส่วนผลลัพธ์ของกฎเป็นฟังก์ชันของตัวแปรเชิงภาษาขาเข้าในกรณีนี้กฎข้อที่ i สามารถแสดงได้ในรูปของ

$$R_i\text{:IF } (u^1 \text{ is } A_i^1, .., \text{AND } u^p \text{ is } A_i^p) \text{ THEN } z = f_i(u^1, ..., U^2)$$

โดย $u^1, ..., u^p$ และ z เป็นตัวแปรเชิงภาษาที่แสดงตัวแปรสภาวะ และตัวแปรควบคุม ตามลำดับ $A_i^1, ..., A_i^p$ เป็นค่าเชิงภาษาของตัวแปรเชิงภาษา u^1 u ใน universe of discourse U , U , ..., U ตามลำดับ โดย i = 1, 2, ..., n และ f เป็นฟังก์ชันของตัวแปรสภาวะ u^1 u ซึ่งนิยามในปริภูมิย่อยขาเข้า

เพื่อความง่ายสมมติว่าเรามีกฎการควบคุมฟัซซี 2 กฎดังนี้

R_1:IF u^1 is A_1^1 AND u^2 is A_1^2 THEN $z = f_1(u^1, u^2)$

R_2:IF u^1 is A_2^1 AND u^2 is A_2^2 THEN $z = f_2(u^1, u^2)$

ค่าการควบคุมที่ได้จากกฎที่หนึ่งคือ $\alpha_1 f_1(u_0^1, u_0^2)$ และที่ได้จากกฎที่สองคือ $\alpha_2 f_2(u^1, u^2)$ ดังนั้นการควบคุมที่เป็นค่าตายตัวจะอยู่ในรูป

$$\frac{\alpha_1 f_1(u_0^1, u_0^2) + \alpha_2 f_2(u^1, u^2)}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

ภาคผนวก ค.

โปรแกรมช่วยหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID โดยใช้ฟัซซีลอจิกในงานวิจัยนี้ พัฒนาด้วยโปรแกรม MATLAB version 4.0 ของ MATHWORK ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการไมโครซอฟท์วินโดว์ เพราะฉะนั้นเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีระบบปฏิบัติการดังกล่าวและได้ทำการติดตั้งโปรแกรม MATLAB และการ์ด A/D พร้อมทั้งต่อสายสัญญาณเข้า 2 สัญญาณจากระบบควบคุมกระบวนการที่เราต้องการจะปรับค่า PID คือ 1.สัญญาณค่าปรับตั้ง (SV) และ 2.สัญญาณตัวแปรกระบวนการ (PV) เรียบร้อยแล้วก็สามารถใช้งานโปรแกรมนี้ได้

<u>การเข้าสู่โปรแกรม</u>

มีขั้นตอนดังนี้คือ

1. เข้าสู่โปรแกรม MATLAB for Windows V.4.0 โดยการดับเบิลคลิกที่ไอคอน ดังแสดงในรูปที่ ค.1
2. ที่ prompt ของโปรแกรม MATLAB ดังแสดงในรูปที่ ค.2 ให้พิมพ์ tune ↵ เป็นการเข้าสู่โปรแกรมช่วยหาค่า PID ซึ่งจะได้หน้าจอดังแสดงในรูปที่ ค.3

<u>การตั้งค่าตัวเลือกของโปรแกรม</u>

จากรูปที่ ค.3 ในแต่ละรายการของตัวเลือกมีความหมายดังต่อไปนี้

1. <u>ชนิดของตัวควบคุม PID</u> ที่ใช้อยู่

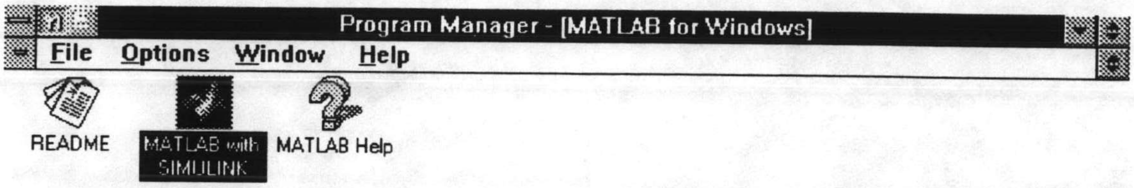
เป็นการบอกให้โปรแกรมทราบว่าตัวควบคุม PIDที่เราใช้อยู่มีโครงสร้างอย่างไรมีให้เลือก 2 แบบ คือ

1.1 <u>Standard Type (Series)</u> หมายถึง ตัวควบคุมที่มีสมการการควบคุมดังนี้

$$mv(t) = \frac{100}{PB}\left(e(t) + \frac{1}{T_i}\int e(t).\,dt + T_d\,\frac{de(t)}{dt}\right)$$

1.2 <u>Independent Gain Adjustment Type (Parallel)</u> หมายถึง ตัวควบคุมที่มีสมการการควบคุมดังนี้

$$mv(t) = \frac{100}{PB}e(t) + \frac{1}{T_i}\int e(t).\,dt + T_d\,\frac{de(t)}{dt}$$



รูปที่ ค.1 การเข้าสู่โปรแกรม MATLAB

2. <u>ลักษณะของการควบคุมที่ต้องการ</u>

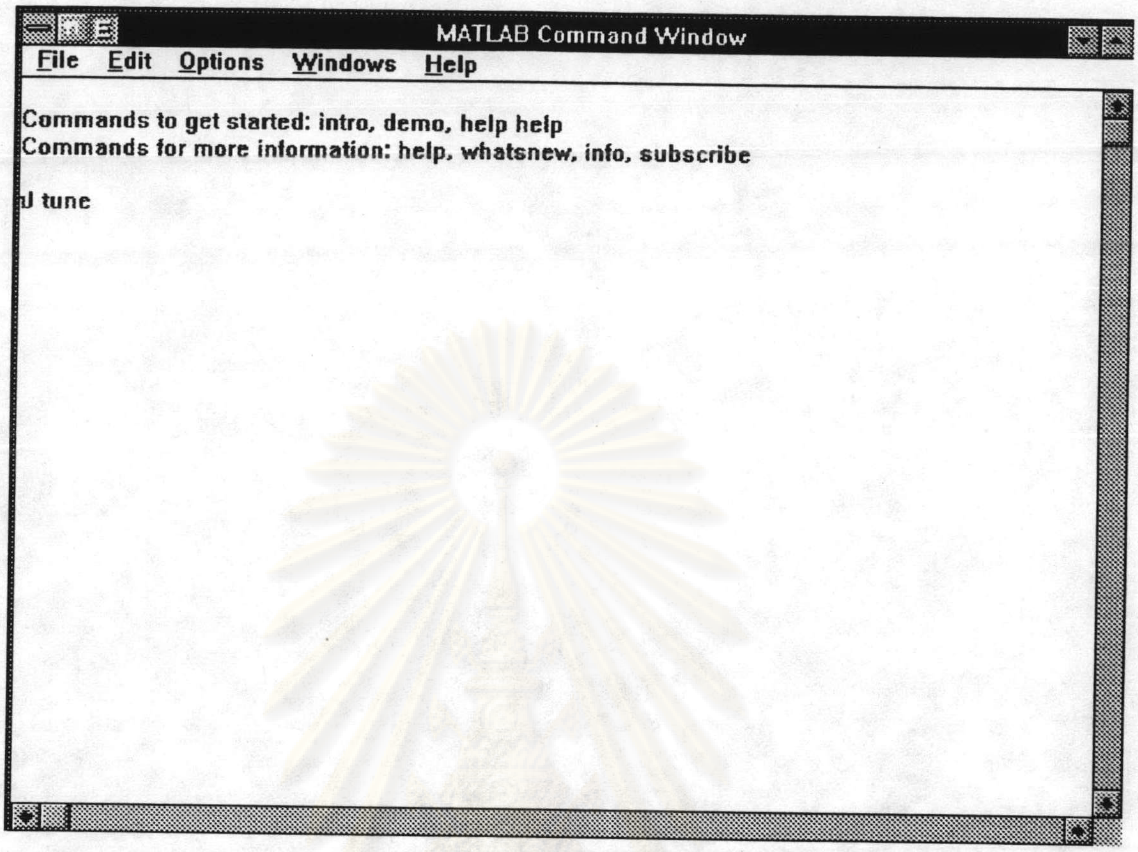
เป็นการบอกให้โปรแกรมทราบว่าเราต้องการให้ตัวควบคุมมีโหมดการควบคุมอย่างไร มีให้เลือก 2 โหมด คือ

2.1 <u>Proportional plus Integral (PI)</u> เป็นการปรับเฉพาะค่าพารามิเตอร์ PB และ Ti เท่านั้น ส่วนค่า Td ให้มีค่าเท่ากับ ศูนย์ เหมาะสำหรับระบบที่มีความไวต่อสัญญาณรบกวนสูง จึงไม่ควรใช้โหมดการควบคุมแบบ Derivative

2.2 <u>Proportional plus Integral plus Derivative (PID)</u> เป็นการปรับค่าพารามิเตอร์ทุกตัว คือ PB,Ti,Td เหมาะสำหรับระบบที่มีการตอบสนองช้าและมีสัญญาณรบกวนน้อย

3. <u>ข้อกำหนดสมรรถนะที่ต้องการ</u>

เป็นการบอกให้โปรแกรมทราบว่าเราต้องการผลตอบสนองของกระบวนการต่อการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดของจุดปรับตั้ง (Setpoint หรือ Setting Value) มีให้เลือก 4 แบบ คือ



รูปที่ ค.2 การเข้าสู่โปรแกรมช่วยหาค่า PID

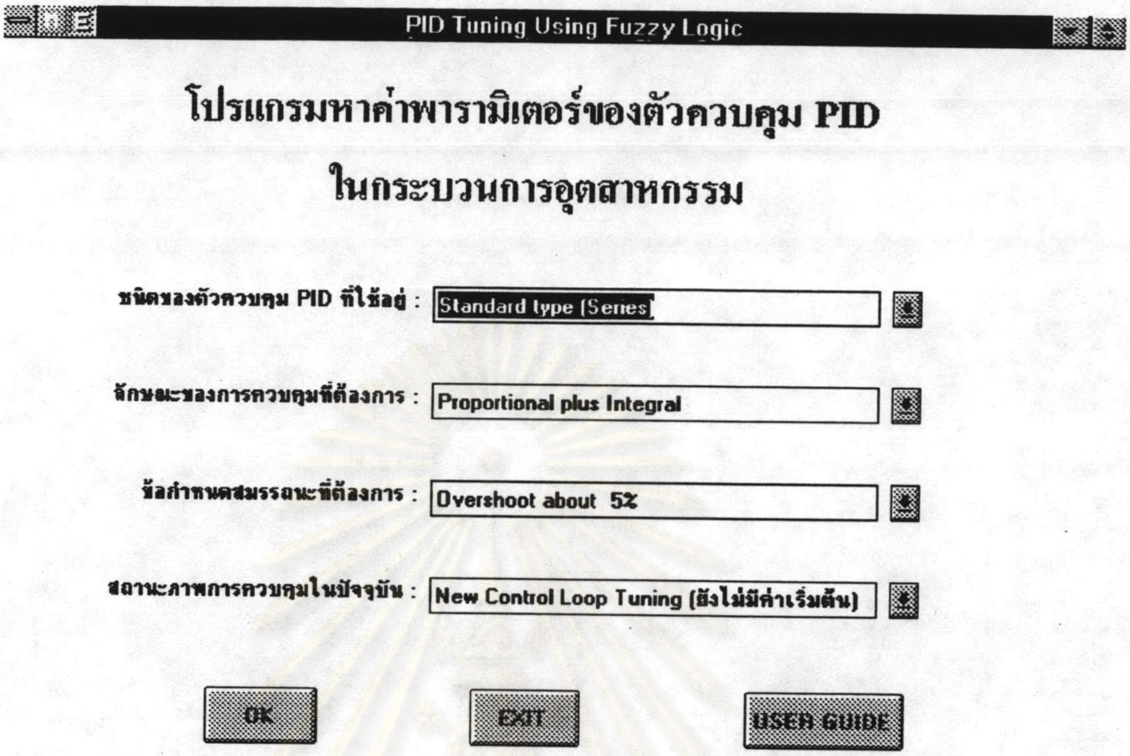
3.1 <u>Overshoot about 5 %</u> หมายถึง ต้องการให้ผลตอบสนองของกระบวนการมีค่าส่วนพุ่งเกินสูงสุดประมาณ 5 % ของขนาดการเปลี่ยนแปลงของจุดปรับตั้งแบบขั้นบันไดข้อดีของวิธีนี้คือมีค่าส่วนพุ่งเกินน้อย แต่ว่าค่า Rise time จะมีค่ามาก

3.2 <u>Overshoot about 10 %</u> หมายถึง ต้องการให้ผลตอบสนองของกระบวนการมีค่าส่วนพุ่งเกินสูงสุดประมาณ 10 % ของขนาดการเปลี่ยนแปลงของจุดปรับตั้งแบบขั้นบันได วิธีนี้จะมีค่าส่วนพุ่งเกินปานกลาง และค่า Rise time มีค่าปานกลาง

3.3 <u>Overshoot about 15 %</u> หมายถึง ต้องการให้ผลตอบสนองของกระบวนการมีค่าส่วนพุ่งเกินสูงสุดประมาณ 15 % ของขนาดการเปลี่ยนแปลงของจุดปรับตั้งแบบขั้นบันได ข้อดีของวิธีนี้คือ Rise time มีค่าน้อย แต่จะมีค่าส่วนพุ่งเกินมาก

3.4 <u>Quarter Decay Ratio</u> หมายถึง ต้องการให้ผลตอบสนองของกระบวนการมีค่าอัตราการหน่วงเศษหนึ่งส่วนสี่

4. <u>สถานะภาพการควบคุมในปัจจุบัน</u>



รูปที่ ค.3 หน้าจอในการตั้งค่าตัวเลือกของโปรแกรมช่วยหาค่า PID

เป็นการบอกให้โปรแกรมทราบว่าสถานะภาพของการควบคุมในปัจจุบันของ Control Loop ที่เราต้องการจะปรับค่านั้นเป็นอย่างไร มีให้เลือก 2 แบบ คือ

4.1 <u>New Control Loop Tuning</u> หมายถึง Control Loop ของเรา เป็น Loop ใหม่ที่พึ่งนำเข้าใช้งาน ยังไม่มีค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น

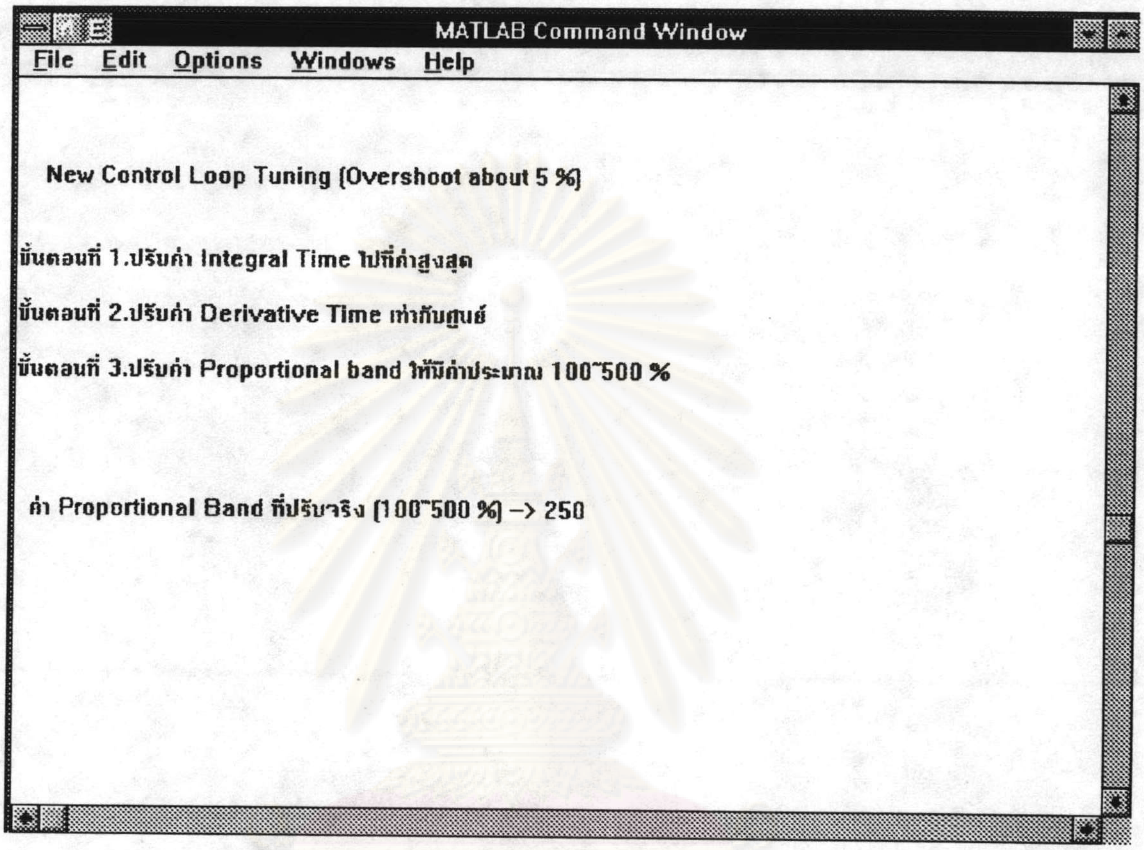
4.2 <u>Improve Control Loop Tuning</u> หมายถึง Control Loop ของเรา เป็น Loop ที่กำลังใช้งานอยู่และมีค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นอยู่แล้ว

<u>ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม</u>

สมมติว่า เราตั้งค่าตัวเลือกต่อไปนี้ คือ

1. ชนิดของตัวควบคุม PID ที่ใช้อยู่ เราเลือก Standard Type (Series)
2. ลักษณะของการควบคุมที่ต้องการ เราเลือก PID
3. ข้อกำหนดสมรรถนะที่ต้องการ เราเลือก Overshoot about 5 %
4. สถานะภาพการควบคุมในปัจจุบัน เราเลือก New Control Loop Tuning

เมื่อเราเลือก OK โปรแกรมจะเริ่มการทำงาน โดยบอกให้ผู้ใช้ปรับค่า T_i ให้มีค่าสูงสุด และปรับค่า PB เริ่มจากค่ามากประมาณ 100-500 % ดังแสดงในรูปที่ ค.4



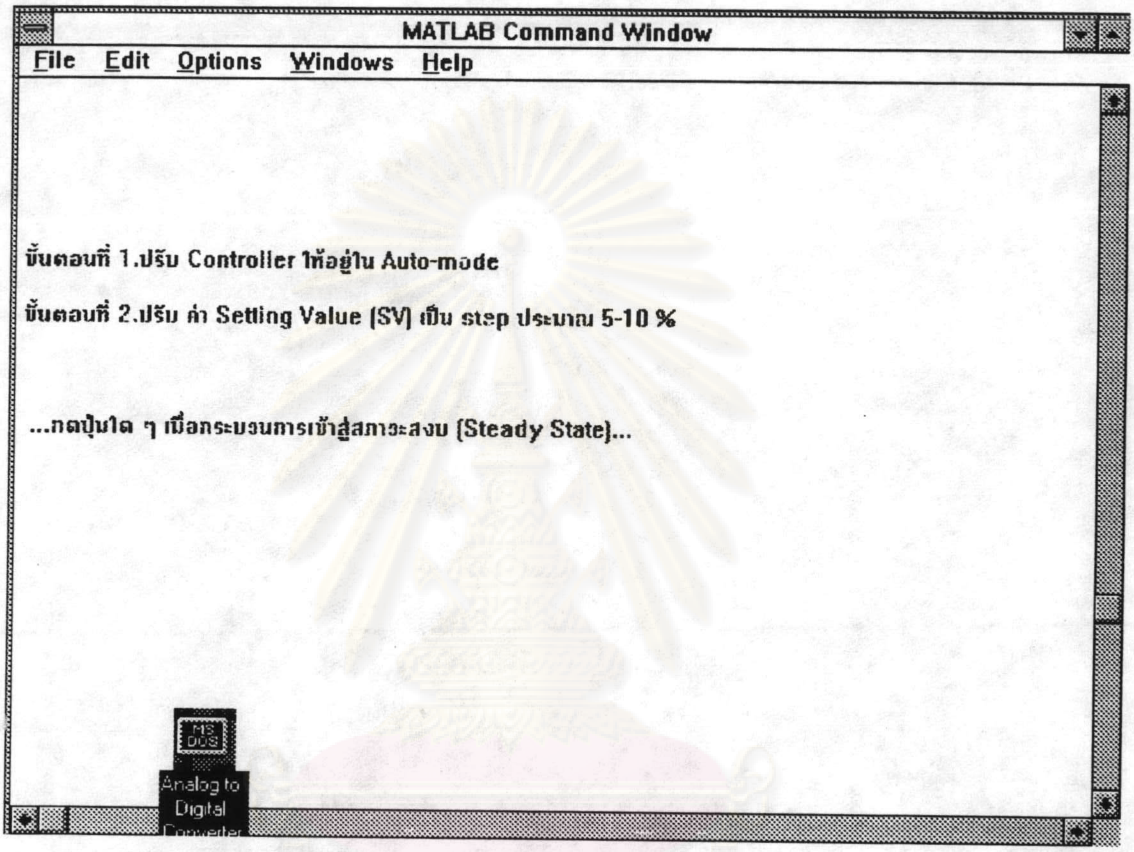
รูปที่ ค.4 หน้าจอแสดงการเริ่มปรับค่า PB ใน New Control Loop Tuning

หลังจากป้อนค่า PB เริ่มต้นที่เราปรับแล้ว โปรแกรมจะทำการบอกผู้ใช้ให้ปรับตั้งตัวควบคุมเป็นแบบอัตโนมัติ และป้อนค่าปรับตั้งเป็นขั้นบันได และรอเก็บผลตอบทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ ค.5

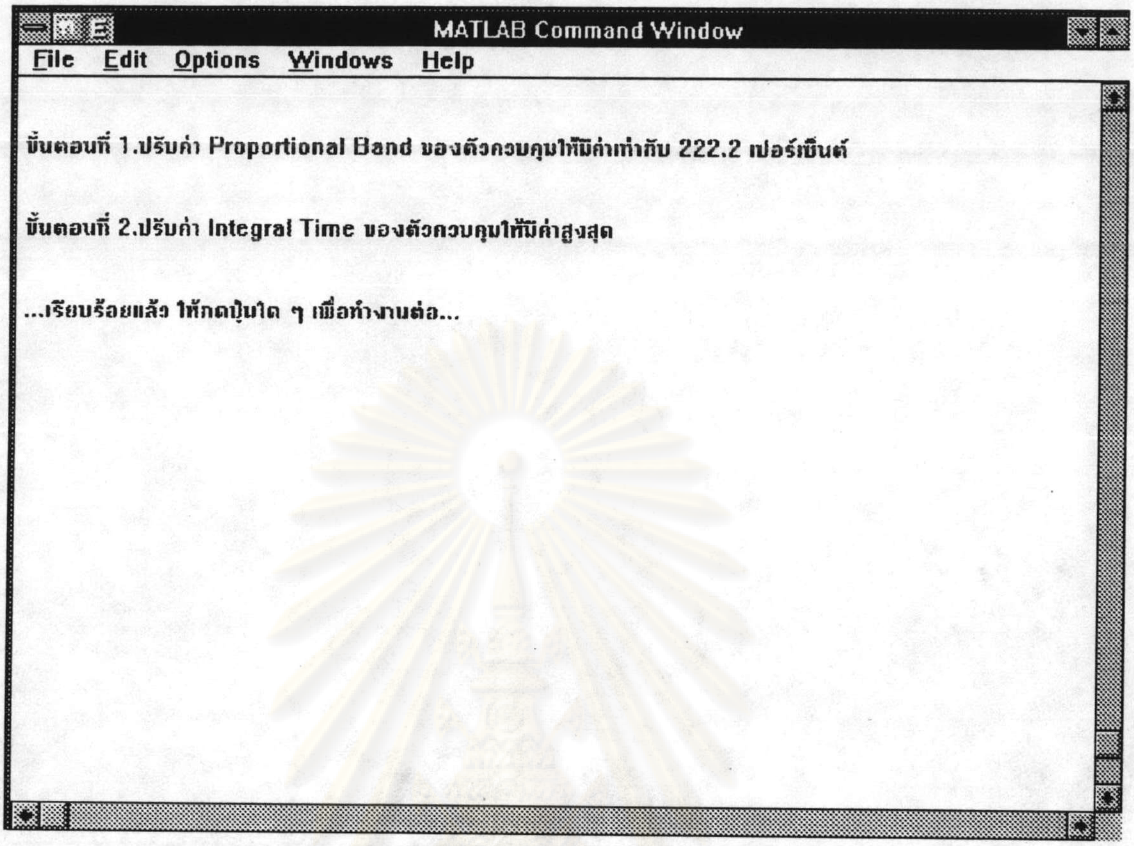
จากนั้นโปรแกรมจะตรวจสอบว่าผลตอบเริ่มมีการแกว่งหรือยัง ถ้ายังโปรแกรมจะบอกให้ผู้ใช้ลดค่า PB ดังแสดงในรูปที่ ค.6 และทำการเก็บผลตอบดังในรูปที่ ค.5 อีก เป็นอย่างนี้เรื่อยไปจนกว่าผลตอบจะเริ่มมีการแกว่ง เมื่อผลตอบมีการแกว่ง โปรแกรมจะสามารถคำนวณค่า PID เริ่มต้นได้ ดังแสดงในรูปที่ ค.7

หลังจากนั้นโปรแกรมจะเริ่มทำการปรับละเอียด (Fine Tune) โดยจะเก็บผลตอบดังแสดงในรูปที่ ค.5 อีก และแสดงผลการคำนวณดังในรูปที่ ค.8 เป็นอย่างนี้เรื่อยไปจนกว่าค่า

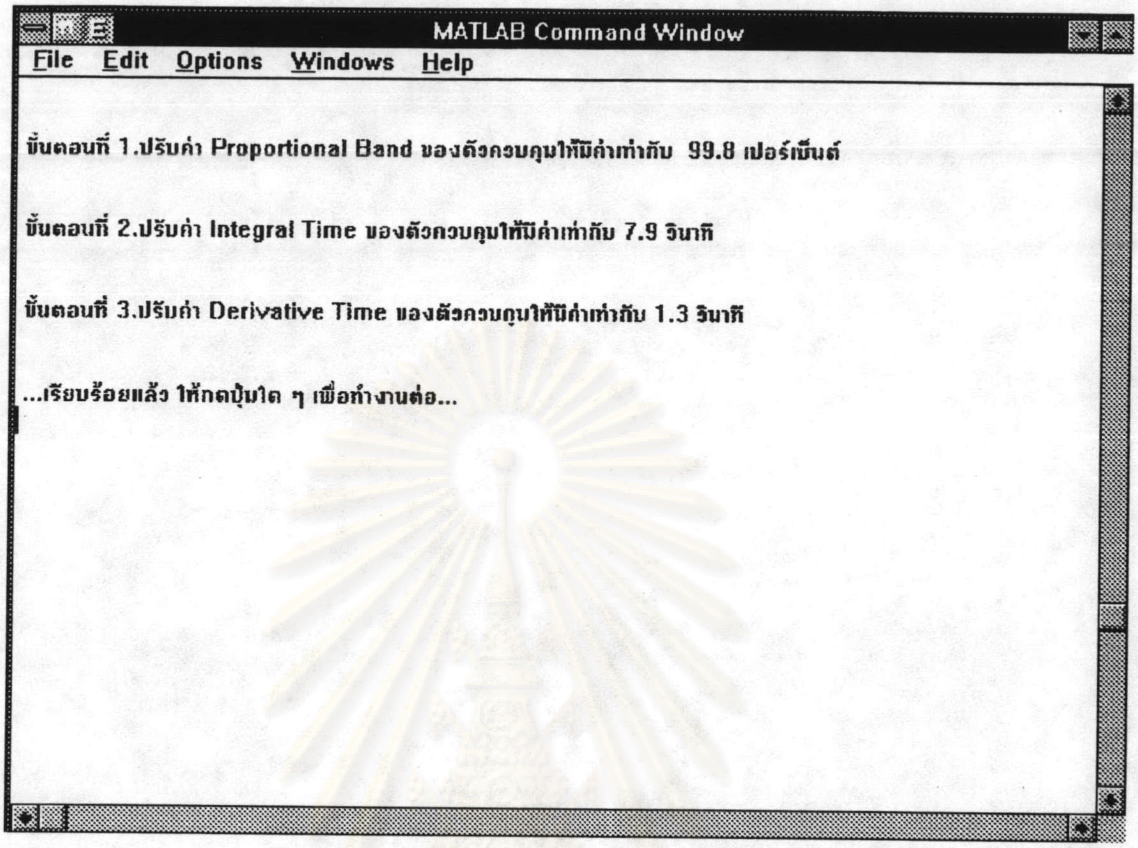
Maximum Overshoot จะมีค่าประมาณ 5 % ดังที่เราต้องการ โดยที่ค่า Overshoot Ratio ต้องไม่เกินหนึ่ง โปรแกรมจึงจะจบการทำงาน



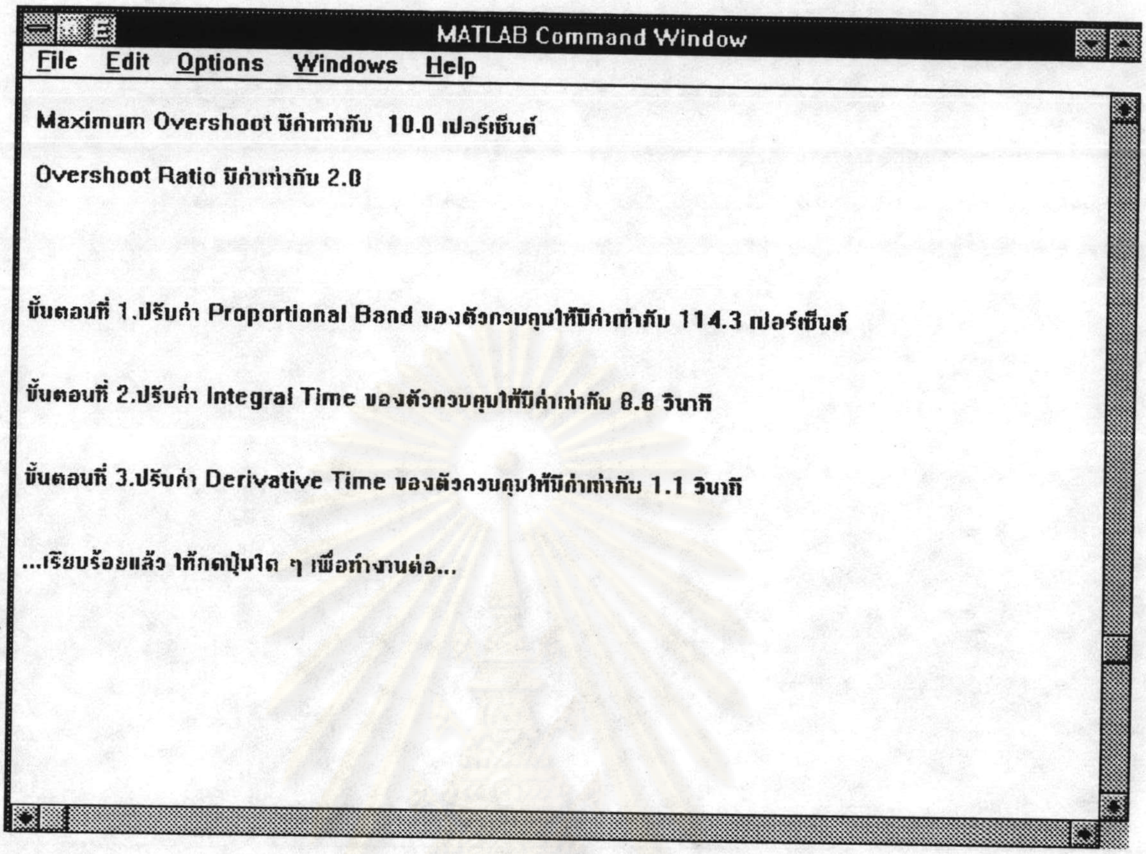
รูปที่ ค.5 หน้าจอการเก็บผลตอบของกระบวนการ



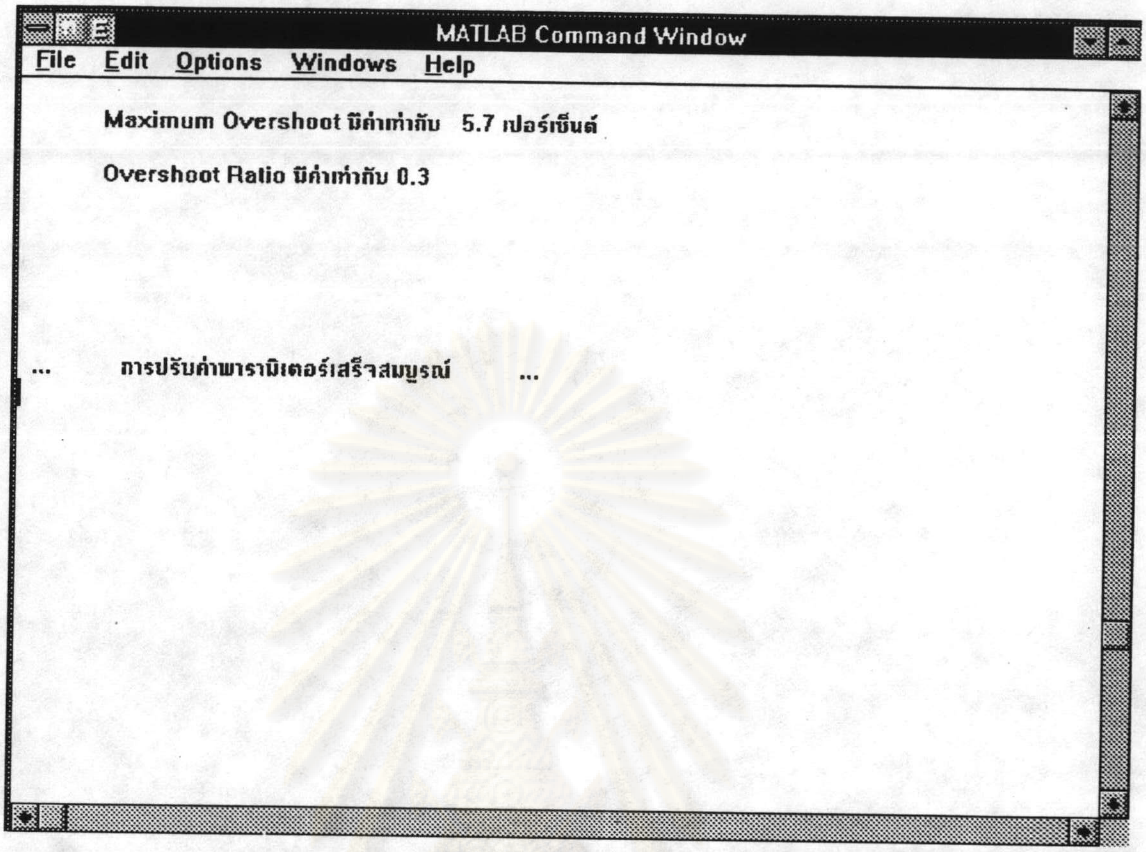
รูปที่ ค.6 หน้าจอแสดงค่า PB ในขณะที่ผลตอบยังไม่เริ่มเกิดการแกว่ง



รูปที่ ค.7 หน้าจอแสดงค่า PID เริ่มต้นที่คำนวณได้หลังจากผลตอบเริ่มเกิดการแกว่ง



รูปที่ ค.8 หน้าจอแสดงค่า PID ในขณะที่มีการปรับละเอียด



รูปที่ ค.9 หน้าจอแสดงผลการปรับค่า PID เสร็จสมบูรณ์

ภาคผนวก ง.

ในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นว่ากลไกการนิรนัยแบบ Rs ไม่สามารถนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้ โดยแสดงการคำนวณไว้สำหรับกรณีที่ข้อมูลเข้าเป็นฟัซซีซิงเกิลตันดังนี้

สมมติเราต้องการหาผลลัพธ์สำหรับกฎย่อยข้อที่ i สำหรับ PB ซึ่งมีกฎที่เกี่ยวข้องคือ

IF (os is Os_i AND osr is OSR_i) THEN (PB is PB_i)

โดยกำหนดให้ OS และ OSR เป็นฟัซซีซิงเกิลตันที่มีค่าระดับความเป็นสมาชิกเป็น 1 ที่ os_0 และ osr_0 ตามลำดับ และเป็นข้อมูลขาเข้าของกฎย่อยที่เราต้องการหาผลลัพธ์ เราจะได้ว่า

$$
\begin{aligned}
\mu_{PB_i}(PB) &= \sup_{os,osr}\Big\{\min\Big(AND(\mu_{OS}(os),\mu_{OSR}(osr)), AND(\mu_{OS_i}(os),\mu_{OSR_i}(osr)) \rightarrow \mu_{PB_i}(PB)\Big)\Big\} \\
&= \sup_{os,osr}\Big\{\min\Big(\min(\mu_{OS}(os),\mu_{OSR}(osr)), \min(\mu_{OS_i}(os),\mu_{OSR_i}(osr)) > \mu_{PB_i}(PB)\Big)\Big\} \\
&= \min\Big(\min(\mu_{OS}(os_0),\mu_{OSR}(osr_0)), \min(\mu_{OS_i}(os_0),\mu_{OSR_i}(osr_0)) > \mu_{PB_i}(PB)\Big) \\
&= \min\Big(1, \min(\mu_{OS_i}(os_0),\mu_{OSR_i}(osr_0)) > \mu_{PB_i}(PB)\Big) \\
&= \min(\mu_{OS_i}(os_0),\mu_{OSR_i}(osr_0)) > \mu_{PB_i}(PB) \\
&= \alpha_i > \mu_{PB_i}(PB) \\
&= \begin{cases} 1 & ;\alpha_i \le \mu_{PB_i}(PB) \\ 0 & ;\alpha_i > \mu_{PB_i}(PB) \end{cases}
\end{aligned}
$$

จากผลลัพธ์ที่ได้จะเห็นว่า α_I ของกฎข้อนั้นมีค่าน้อยเท่าใด ผลลัพธ์ที่ได้ก็จะเป็นฟัซซีเซตครอบคลุมค่าในย่านที่กว้างมากขึ้นเท่านั้ และในกรณีที่ค่า α_I มีค่าเท่ากับ 0 เราจะได้ฟัซซีเซตผลลัพธ์เท่ากับ UOD ของตัวแปรขาออกนั้นๆเลยทีเดียว และเมื่อนำผลลัพธ์ย่อยที่ได้มารวมกันด้วยตัวดำเนินการยูเนียนเราจะได้ผลลัพธ์เป็นฟัซซีเซตที่มีค่าความเฉพาะเจาะจงน้อยลงเรื่อย ๆ และถ้ามีกฎใดแม้เพียงกฎเดียวที่มีค่า α_I เท่ากับ 0 เราจะได้ผลลัพธ์รวมเป็น UOD ของตัวแปรขาออกในทันที

สำหรบงานวิจัยนี้พบว่าสำหรับค่าข้อมูลขาเข้าแต่ละคู่จะทำให้กฎย่อย ๆ อย่างน้อยหนึ่งกฎมีค่า α_I เท่ากับ 0 เสมอ ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากกฎการนิรนัยแบบ Rs จึงมีค่าเหมือนกันหมด

สำหรับข้อมูลเข้าทุกค่า คือเป็นฟัซซีเซตที่เท่ากับ UOD ของตัวแปรขาออก ซึ่งถือว่าเป็นฟัซซีเซตที่ไม่สามารถแทนจำนวนจริงใดๆได้อย่างเหมาะสมแม้แต่ตัวเดียวเนื่องจากจำนวนจริงทุกตัวในย่านของ UOD มีค่าระดับความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ทั้งหมด ผลลัพธ์จากการนิรนัยแสดงให้เห็นว่ากฎการนิรนัยแบบ Rs นี้ไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เราจึงใช้กฎการนิรนัยแบบ Rp

ประวัติผู้เขียน

นายพิจารณ์ ประกิจ เกิดวันที่ 6 พฤษภาคม พ.ศ. 2511 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2533 จากนั้นเข้าทำงานที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เป็นเวลา 2 ปี และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2536