

รายการอ้างอิง

1. Song, Y.; Kim, H.K.; and Yam, K.L. Respiration rate of blueberry in modified atmosphere at various temperature. J.Amer.Soc.Hort.Sci. 117(June 1992) : 925-929.
2. งามทิพย์ ภู่วโรดม. ก๊าซกับการบรรจุภัณฑ์อาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์สำนักส่งเสริมและฝึกอบรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2537.
3. จริงแท้ ศิริพานิช. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2541.
4. Mclaughlin, C.P.; and O'Beirne, D. Respiration rate of a dry coleslaw mix as affected by storage temperature and respiratory gas concentrations. Journal of Food Science 64, 1 (1999) : 116-119.
5. Reoney, M.L. Active food packaging. New York : Blackie Academic & Professional, 1995.
6. Pepelenbos, H.W.; and Janan van't Leven. Evaluation of four types of inhibition for modelling the influence of carbondioxide on oxygen consumption of fruits and vegetables. Postharvest Biology and Technology 7 (1996) : 27-40.
7. Lee, D.S.; Hagger, P.E.; and Yam, K.L. Model for fresh produce respiration in modified atmosphere based on principles of enzyme kinetics. Journal of Food Science 56, 6 (1991) : 1520-1585.
8. Robinson, J.E.; Browne, K.M.; and Burton, W.G. Storage characteristics of some vegetables and soft fruits. Ann.appl.Biol. 81(1975) : 399-408.
9. Kader, A.A.; Zagory, D.; and Kerbal, E.L. Modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. Critical reviews in food science and nutrition 28, 1 (1989) : 1-30.
10. Parry, R.T. Principles and applications of modified atmosphere packaging of foods. New York : Blackie Academic & Professional, 1989.
11. อาภัสสรฯ ชมิทธ์. ชีวเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 2. จัดพิมพ์โดย กรุงเทพมหานคร : เค.ยู.เพลส, 2537.
12. Pautastics, ER.B. Postharvest physiology handling and utilization of tropical and subtropical fruit & vegetable. University of philiphines : AVI, 1990.

13. Pauly, S. Permeability and diffusion data. In J. Brandrup; and E.H. Immergut, Polymer handbook, pp. 435-449. USA : John wiley and Sons, 1989.
14. Thompson, A.K. Controlled atmosphere storage of fruits and vegetables. UK : CAB International, 1998.
15. Exam, A.; Lencki, R.W.; and Toupin, C. Suitability of plastic films for modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. Journal of Food Science 58, 6 (1993) : 1365-1370.
16. Makino, Y.; Iwasaki, K.; and Hirata, T. A theoretical model for oxygen consumption in fresh produce under on atmosphere with carbondioxide. Journal of Agricultural Engineering Research 65(1996) : 193-203.
17. Talasila, P.C.; Chau, K.V.; and Brecht, J.K. Design of rigid modified atmosphere packages for fresh fruits and vegetables. Journal of Food Science 60, 4(1995) : 758-761.
18. Loncin, M. Mass transfer and permeability. In M. Mathlouthi, Food packaging and preservation theory and practice. pp. 1-24. New York : Elsevier applied science, 1985.
19. Finah C.R. Plastics fabrication. In William E.Brown, Plastics in food packaging. pp. 139-192. New York : Marcel Dekker, 1992.
20. Eskin, N.A.M.; and Robinson, D.S. Food shelf life stability chemical, biochemical and microbiological changes. New York : CRC Press, 2001.
21. Bixler, H.J.; and Sweeting, O.J. Barrier properties of polymer films. In Sweeting O.J. (ed.), The science and technology of polymer films. pp. 1-130. New York : Wiley-Interscience, 1971.
22. Crank, J.; and Park, G.S. Diffusion in polymer. New York : Academic Press, 1968.
23. Stannett, V. Simple gas. In J.crank; and G.S. Park, Diffusion in polymer. pp. 42-73. New York : Academic press, 1968.
24. Joseph F.H. Handbook of package engineering. New York : McGraw-Hill, 1984.
25. กรุงเทพฯ, ธนาคาร. สินค้าส่งออกที่สำคัญ(1). รายการเศรษฐกิจ. 34, 10 (ตุลาคม 2544) : 72.
26. เกศินี วิฑูรชาติ. การวิจัยเชิงปฏิบัติการ. กรุงเทพมหานคร : คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2542.

27. เอกสารการสอนชุดวิชา การวิจัยเชิงปฏิบัติการ 32404 หน่วยที่ 1-9. พิมพ์ครั้งที่ 5.
กรุงเทพมหานคร : สาขาวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, 2532.
28. Selke, E.M.S. Understanding plastics packaging technology. 1 st ed. USA :
Hanser, 1997.
29. Briston J.H.; and Katan L.L. Plastics films. 3 rd ed. England : Longman Scientific &
Technical, 1989.
30. Hessenburch R. Blown film coextrusion. In Friedhelm H.(ed.), Plastic extrusion
technology. pp. 137-159. New York : Haneer, 1997.
31. Jobling J. Modified atmosphere packaging : Not as simple as it seems[on line].
(2001). Available from: http://www.postharvest.com.au/MAP_article.PDF. [2002.
January 30]
32. Makino Y.; Iwasaki K.; and Hirata T. Application of transition state theory in model
Development for temperature dependence of respiration of fresh produce.
Journal of Agricultural Engineering Research. 67 (1997) : 47-59.
33. Lee, D.S.; Lee, K.S.; Park, I.S.; and Yam, K.L. Analysis of respiration characteristics
of low CO₂ tolerance produce for designing modified atmosphere
packages. Food & Biotech. 3, 2 (1994) : 99-103.
34. Sannai Gong and Kenneth A, Corey. Predicting steady state oxygen concentrations
in modified atmosphere packages of tomatoes Journal of American Society
Horticultural Science. 119, 3 (1994) : 546-550.
35. สมาคมอุตสาหกรรมพลาสติกไทย. อายุการเก็บรักษาผักและผลไม้. วารสารพลาสติก ปีที่ 17
, 4(เดือน ก.ค. – ส.ค. 2544) : 25-30.
36. Marcus Material Co. Technical Data[Online]. (n.d.). Available from:
<http://www.mcelwee.net/index.html>[2002. January 20]
37. Ellis, E. Polymer A property database. CRC Press LLC [Online]. 2000. Available
from: <http://www.polymersdatabase.com>[2002. January 20]
38. สมาคมอุตสาหกรรมพลาสติกไทย. บรรจุภัณฑ์สำหรับบรรยากาศดัดแปร. วารสารพลาสติก ปี
ที่ 17 ฉบับที่ 3(เดือน พ.ค. – มิ.ย. 2544) :
39. มยุรี หาลำเจียก. บรรจุภัณฑ์พลาสติกสำหรับอาหาร. วารสารพลาสติก 14(กรกฎาคม-
สิงหาคม 2540) : 23-26.

40. Convexplastics. Product[Online]. (n.d.) Available from:
<http://www.convexplastics.com/index.html> [2002, January 10]
41. เซาว์น ชิโนรักรัษ และพรณั ชิโนรักรัษ. ชิโนวิทยา. เล่ม 3. พิมพ์ครัั้งที่ 4. (ม.ป.ท.), 2522.
42. Kader, A.A. Respiration and gas exchange of vegetables. In J. Weichmann (ed.), Postharvest physiology of vegetables. pp. 25-43. New York : Marcel Dekker, (n.d.).
43. Robertson, G.L. Food packaging principle and practice. New Zealand : Palmerston North, 1993.
44. สมบุญ เตชะภิณญชัฒน์. สรีรวิทยาของพืช (plant physiology). พิมพ์ครัั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : รั้วเขียว, 2538.
45. Powrie, W.D.; and Skura, B.J. Modified atmosphere packaging of fruits and Vegetables. In B. Ooraikul and M.E. stiles (eds.), Modified atmosphere Packaging of food. pp. 169-228. New York : Ellis Horwood, 1991.
46. Talasila, P.C.; and Cameron, A.C. Free-volume changes in flexible, hermetic packages containing respiring produce. Journal of food science 62, 4 (1997) : 659-664.
47. Den Berg, L.V. Water vapour pressure. In J. Weichmann. Postharvest physiology of vegetables. pp. 203-230. New York : Marcel Dekker, (n.d.).
48. Van den Berg, L.; and Leutz C.P. High humidity storage of vegetables and fruits. Hort science 13, 5 (October 1978) : 565-574.
49. Morgan, P.W. Ind. Eng. Chem. 45 No.10 (1953) : 2296. Cited in M. Mathlouthi. Food packaging and preservation theory and practice. New York : Elsevier applied science, 1985.
50. Stern, S.A.; and Trohalaki, S. Fundamentals of glass diffusion in rubbery and glassy polymers. In William J. Koros (ed.), Barrier polymers and structures. pp. 22-59. Washington D.C. : American Chemical Society, 1990.
51. Makino, Y.; Iwasaki, K.; and Hirata, T. Oxygen consumption model for fresh produce on the basis of adsorption theory. Transactions of the ASAE. 39 (1996) : 1067-1073.

52. Nawa, Y.; Horita, H.; Sato, K.; and Ishitani, T. Quality preservation of fruits and vegetables by simple spotted cooling system and/or by packaging using new plastic films. JARQ 35, 2 (2001) : 105-115.
53. Makino, Y.; and Hirata, T. Modified atmosphere packaging of fresh produce with a biodegradable laminate of chitosan-cellulose and polycaprolactone. Postharvest biology and technology 10(1997) 247-254.
54. Cooksey, K.; and Marsh, K.; and Doar, L.H. Predicting permeability & transmission rate for multilayer materials. Food Technology 53 (September 1999) : 926-930.
55. Griffin, R.C.; and Sacharow, S. Principles of package development. 3 rd ed. USA : AVI, 1980.
56. ชัยวุฒิ ชัยพันธุ์. วิจัยเชิงปฏิบัติการด้วยเบสิก สำหรับ IBMPC. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โครงการตำราวิทยาศาสตร์อุตสาหกรรม, 2531.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก กลไกการหายใจ

การหายใจหรือการออกซิไดส์น้ำตาลในพืชซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดต่อเนื่องจนได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำตาลอดทั้งพลังงานเพื่อนำไปใช้ในเซลล์ ประกอบด้วยขั้นตอนหลักสำคัญ 3 ขั้นตอน [44] คือ

- ก.1 ไกลโคไลซิส (Glycolysis)
- ก.2 วัฏจักรเครบส์ (Kreb's cycle)
- ก.3 ระบบการถ่ายทอดอิเล็กตรอน (Electron transport system)

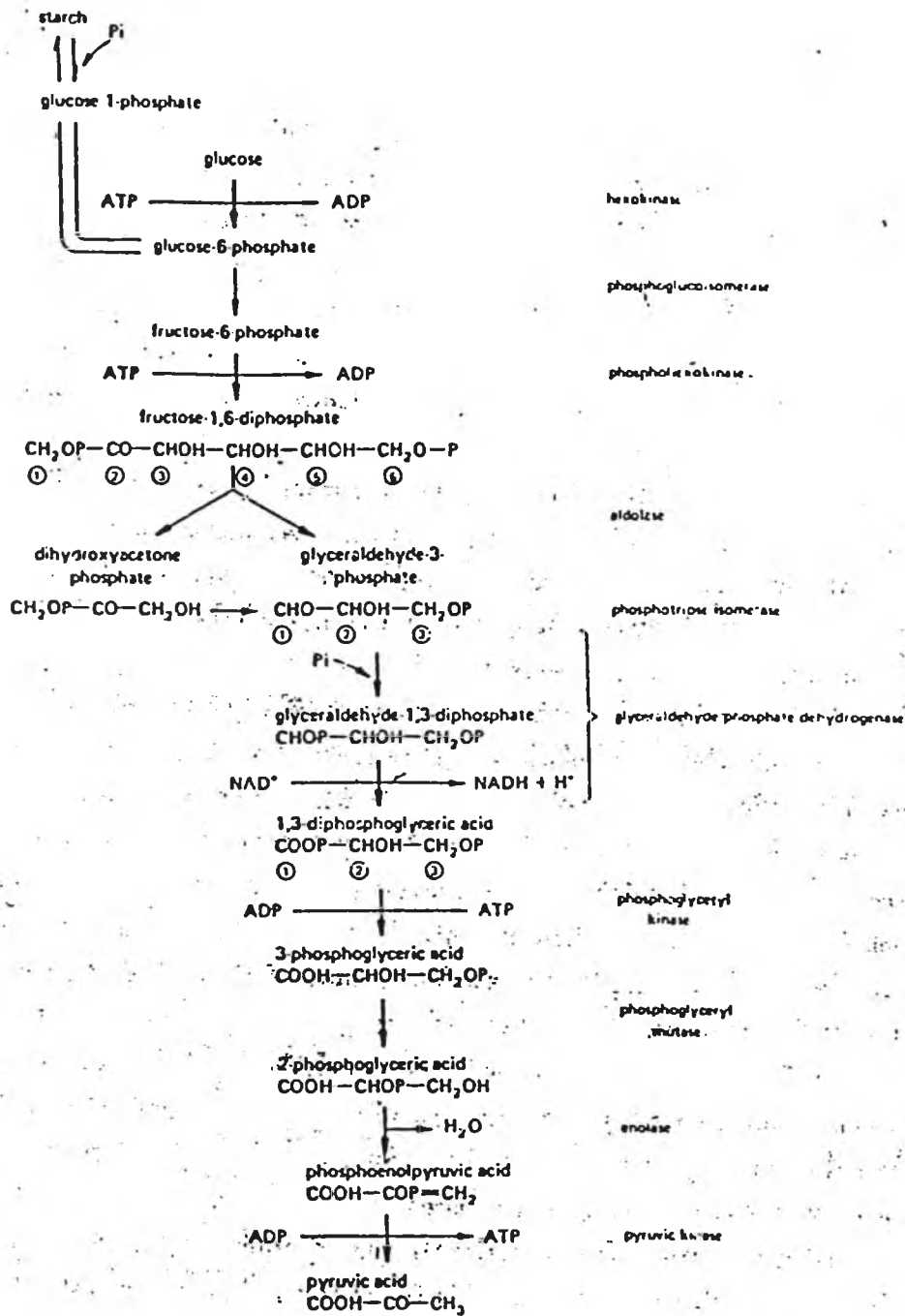
ก.1 ไกลโคไลซิสหรือกระบวนการเอ็มเบน-เมย์เออร์ฮอฟ-พาร์เนส (Glycolysis or Embden Mayerhof-Parnas, EMP)

ไกลโคไลซิสเป็นกระบวนการที่น้ำตาลกลูโคสถูกย่อยหรือออกซิไดส์ไปเป็นกรดไพรูวิก (Pyruvic acid) เกิดขึ้นในไซโทพลาซึมของเซลล์ที่มีชีวิต ทั้งในสภาพที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน ขั้นตอนต่าง ๆ ของปฏิกิริยาในกระบวนการนี้ตลอดทั้งเอ็นไซม์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาแสดงดังรูป ก.1

กระบวนการไกลโคไลซิสเริ่มต้นโดยน้ำตาลกลูโคสจะถูกกระตุ้นหรือฟอสฟอริเลต (phosphorylate) เสียก่อน โดยกลูโคสจะทำปฏิกิริยากับ ATP (adenosine triphosphate) มีเอ็นไซม์เฮกโซไคเนส (hexokinase) เป็นตัวเร่ง ได้กลูโคส-6-ฟอสเฟต (glucose-6-phosphate) และ ADP (adenosine diphosphate) ปฏิกิริยานี้ต้องใช้พลังงานเป็นจำนวนมากจึงเป็นปฏิกิริยาที่ไม่ย้อนกลับ กลูโคส-6-ฟอสเฟตจะถูกเปลี่ยนต่อไปเป็นฟรุกโตส-6-ฟอสเฟต (fructose-6-phosphate) โดยมีเอ็นไซม์ฟอสโฟกลูโคไอโซเมอเรส (phosphoglucose isomerase) เป็นตัวเร่ง ซึ่งฟรุกโตส-6-ฟอสเฟตนี้จะถูกฟอสฟอริเลตไปเป็นฟรุกโตส-1,6-ไดฟอสเฟต (fructose-1,6-diphosphate) โดยมี ATP และเอ็นไซม์ฟอสโฟฟรุกโทไคเนส ณ จุดนี้เป็นจุดสำคัญที่ควบคุมความเร็วของกระบวนการออกซิไดส์ กลูโคสไปเป็นกรดไพรูวิก เนื่องจากเอ็นไซม์ดังกล่าวเป็นแอลโลสเทอริกเอ็นไซม์ ในปฏิกิริยาต่อไป ฟรุกโตส-1,6-ไดฟอสเฟตจะแตกตัวเป็นสารประกอบที่มีคาร์บอน 3 อะตอม 2 โมเลกุล คือไดไฮดรอกซีอะซิโตนฟอสเฟต (dihydroxy acetone phosphate, DHAP) และกลีเซอรอลดีไฮด์-3-ฟอสเฟต (glyceraldehyde-3-phosphate หรือ GDP) โดยอาศัยกิจกรรมของเอ็นไซม์อัลโดเลส (aldolase) สารทั้ง 2 ตัวที่เกิดขึ้นนี้สามารถเปลี่ยนรูปกลับไปมาซึ่งกันและกันได้ โดยมีเอ็นไซม์ทรีโอสฟอสเฟตไอโซเมอเรส (triose phosphate isomerase) เป็นตัวเร่ง

ขั้นตอนต่อไปของไกลโคไลซิสเกี่ยวข้องกับการออกซิไดส์กลีเซอรอลดีไฮด์-3-ฟอสเฟต โดยมีนิโคตินาไมด์แอดีนินไดนิวคลีโอไทด์ หรือ NAD (nicotinamide adenine dinucleotide) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนเอ็นไซม์ที่เกี่ยวข้องคือกลีเซอรอลดีไฮด์-3-ฟอสเฟตดีไฮโดรจีเนส (glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase) ภายหลังจากการเกิดปฏิกิริยาจะได้ NADH และกรด 1,3-บิสฟอสโฟกลีเซอริก (1,3-bisphosphoglyceric acid) สารที่เกิดขึ้นนี้จะให้ฟอสเฟตแก่ ADP ได้ ATP เกิดขึ้น และกรด 3-ฟอสโฟกลีเซอริก (3-phosphoglyceric acid) โดยมีเอ็นไซม์ฟอสโฟกลีเซอเรสคิเนส (phosphoglycerate kinase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นกรด 3-ฟอสโฟกลีเซอริกจะเปลี่ยนไปเป็นกรด 2-ฟอสโฟกลีเซอริก (2-phosphoglyceric acid) โดยอาศัยเอ็นไซม์ฟอสโฟกลีเซอโรมิวเทส (phosphoglyceromutase) หลังจากนั้นกรด 2-ฟอสโฟกลีเซอริกจะสูญเสียน้ำ 1 โมเลกุล กลายเป็นกรดฟอสโฟอินอลไพรูวิก (phosphoenol pyruvic acid) โดยเอ็นไซม์อินอลเลส (enolase) สำหรับกรดฟอสโฟอินอลไพรูวิกเป็นสารที่ไม่เสถียรจะถูกเปลี่ยนต่อไปเป็นกรดไพรูวิกและให้ฟอสเฟตแก่ ADP เพื่อสร้าง ATP โดยอาศัยเอ็นไซม์ฟอสโฟอินอลไพรูเวตคิเนส (phosphoenolpyruvate kinase)

กระบวนการไกลโคไลซิสนี้มีการสร้าง ATP จากปฏิกิริยาที่มีกรด 1,3-บิสฟอสโฟกลีเซอริก และกรดฟอสโฟอินอลไพรูวิกเป็นซับสเตรตซึ่งเป็นสารที่มีพลังงานสูงเรียกว่า ซับสเตรต เลเวล ฟอสฟอริเลชัน (substrate level phosphorylation) เนื่องจากกลูโคสเป็นสารที่มีคาร์บอน 6 อะตอม แตกตัวให้น้ำตาลที่มีคาร์บอน 3 อะตอมจำนวน 2 โมเลกุล ผลสุดท้ายได้กรดไพรูวิก 2 โมเลกุล ดังนั้นจะเกิด ATP ขึ้น 4 โมเลกุลแต่ ATP ถูกนำไปใช้ในกระบวนการ 2 โมเลกุล จึงเหลือ ATP เกิดขึ้น 2 โมเลกุล



รูปที่ ก.1 ปฏิกริยาและเอ็นไซม์ในกระบวนการไกลโคไลซิส [44]

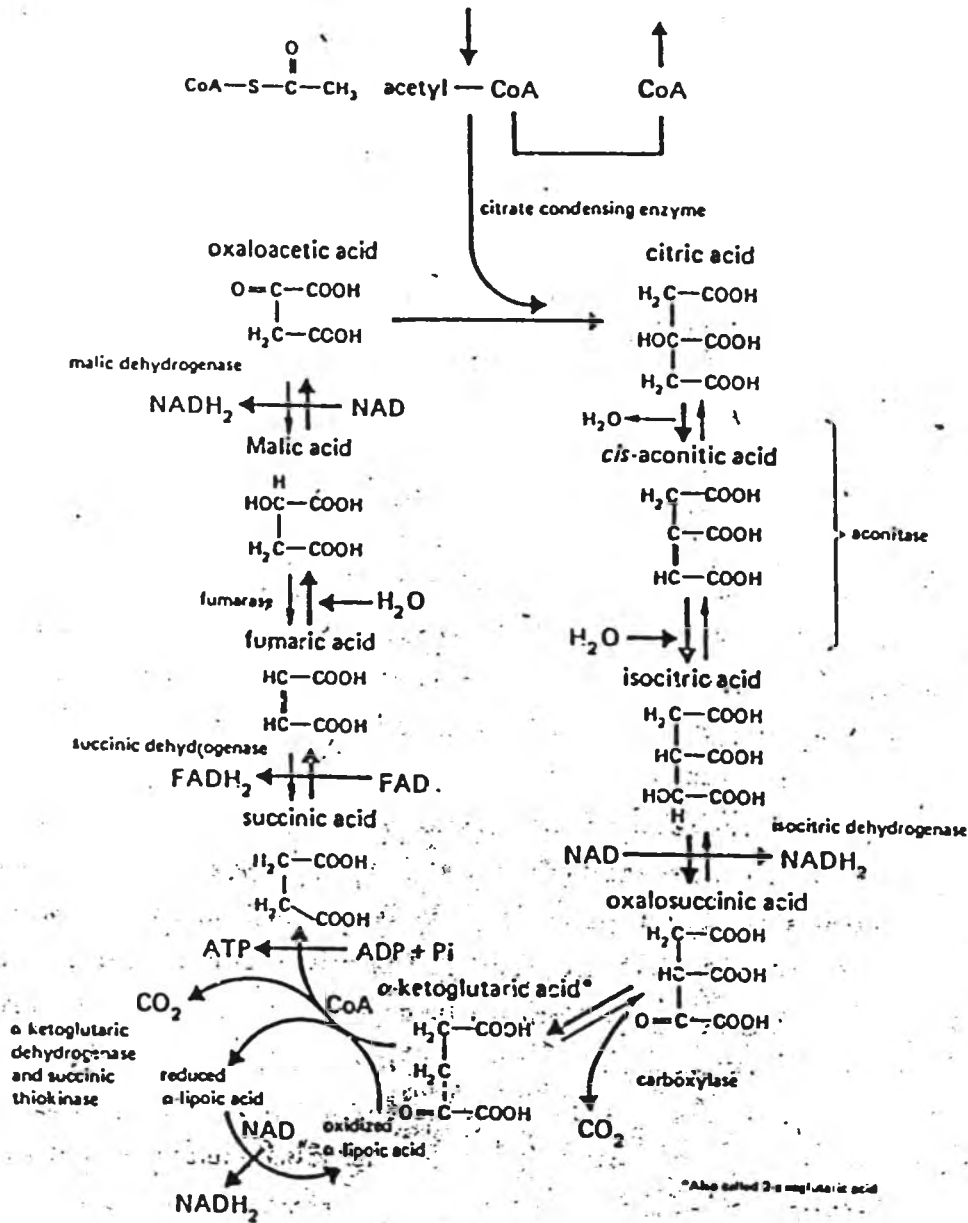
ก.2 วัฏจักรเครบส์หรือวัฏจักรของกรดไตรคาร์บอกซิลิกหรือวัฏจักรของกรดซิตริก (Kreb's cycle or Tricarboxylic acid cycle or Citric acid cycle)

กรดไพรูวิกที่เกิดขึ้นจากไกลโคไลซิสจะถูกออกซิไดส์ต่อไปโดยอาศัยเอนไซม์ต่าง ๆ อีกหลายชนิด จนได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า วัฏจักรเครบส์ (Kreb's cycle)

ขั้นตอนแรกกรดไพรูวิกจะถูกออกซิไดส์โดยเอนไซม์ไพรูวิกแอซิดดีไฮโดรจีเนส (pyruvic acid dehydrogenase) มีโคเอนไซม์-เอ (coenzyme-A) และ NAD เป็นตัวเร่ง ได้อะเซทิลโคเอ (acetyl CoA) ก่อนเข้าทำปฏิกิริยาในวัฏจักรเครบส์ พร้อมกับมีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ และ NADH จัดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดทีฟดีคาร์บอกซิเลชัน (oxidative decarboxylation)

อะเซทิลโคเอเป็นสารเริ่มต้นของวัฏจักรเครบส์จะทำปฏิกิริยากับกรดออกซาลอะซิติก (oxaloacetic acid) โดยเอนไซม์ไอโซซิทริกแอซิดซินเทเทส (isocitric acid synthetase) เป็นตัวเร่งการเกิดกรดซิตริก (citric acid) ซึ่งเป็นสารที่มีคาร์บอน 6 อะตอม หลังจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) ทำให้กรดซิตริกเปลี่ยนไปเป็นกรดซิส-อะโคนิติก (cis-aconitic acid) และกรดไอโซซิทริก (isocitric acid) โดยเอนไซม์ซิส-อะโคนิเทส (cis-aconitase) กรดไอโซซิทริกที่เกิดขึ้นจะปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมเลกุลโดยปฏิกิริยาออกซิเดทีฟดีคาร์บอกซิเลชัน มีเอนไซม์ไอโซซิทริกแอซิดดีไฮโดรจีเนส (isocitric acid dehydrogenase) และ NAD เป็นตัวเร่ง ได้ NADH และกรดแอลฟาดีโทกลูทริก (α - ketoglutaric acid) ซึ่งสารนี้จะถูกออกซิไดส์ต่อไปเป็นซัคซินิลโคเอ (succinyl-CoA) พร้อมกับมีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์อีก 1 โมเลกุล โดยอาศัยเอนไซม์แอลฟาดีโทกลูทริกแอซิดดีไฮโดรจีเนส (α - ketoglutaric acid dehydrogenase) และ NAD กับโคเอนไซม์-เอ ปฏิกิริยานี้จะมี NADH เกิดขึ้นด้วย ซัคซินิลโคเอเป็นสารที่มีพลังงานสูง จะแตกตัวเป็นกรดซัคซินิก (succinic acid) และโคเอนไซม์-เอ โดยเอนไซม์ซัคซินิกแอซิดไทโอไคเนส (succinic acid thiokinase) ในขณะเดียวกันพลังงานที่ได้จะรวมตัวกับกัวโนซีนไดฟอสเฟต (guanosine-diphosphate หรือ GDP) และ Pi ให้กัวโนซีนไตรฟอสเฟต (guanosine-triphosphate หรือ GTP) ซึ่งเป็นสารที่ให้พลังงานสูงของเซลล์อีกรูปหนึ่งที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้ โดยวิธีควบคู่ทางพลังงาน (energy coupling) ซึ่งเรียกว่า ซับสเตรตเลเวล ฟอสฟอริเลชัน กรดซัคซินิกที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดส์ต่อไปเป็นกรดฟูมาลิก (fumaric acid) โดยอาศัยเอนไซม์ซัคซินิกแอซิดดีไฮโดรจีเนส (succinic acid dehydrogenase) และมีโคเอนไซม์เฟลวินแอดีนีนไดนิวคลีโอไทด์ (flavin adenine dinucleotide หรือ FAD) เป็นตัวเร่งและเกิด FADH₂ ขึ้นด้วย กรดฟูมาลิกจะมีการดึงน้ำเข้าร่วมในปฏิกิริยาหรือเกิดไฮโดรลิซิส (hydrolysis) เปลี่ยนเป็นกรดมาลิก (malic acid) โดยมีเอนไซม์ฟูมาเรส (fumarase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในสภาพที่มีโคเอนไซม์ NAD

และอาศัยเอนไซม์มาลิกแอซิดดีไฮโดรจีเนส (malic acid dehydrogenase) กรดมาลิกจะถูกออกซิไดส์ไปเป็นกรดออกซาโลอะซิติก (oxaloacetic) พร้อมทั้งปลดปล่อย NADH ต่อกจากนั้นกรดออกซาโลอะซิติกที่ได้จะรวมตัวกับอะเซทิลโคเอและเริ่มวัฏจักรในรอบต่อ ๆ ไป

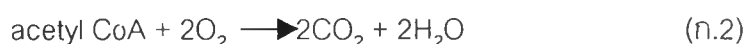


รูปที่ ก.2 ปฏิกริยาและเอนไซม์ต่าง ๆ ในวัฏจักรเครบส์ [44]

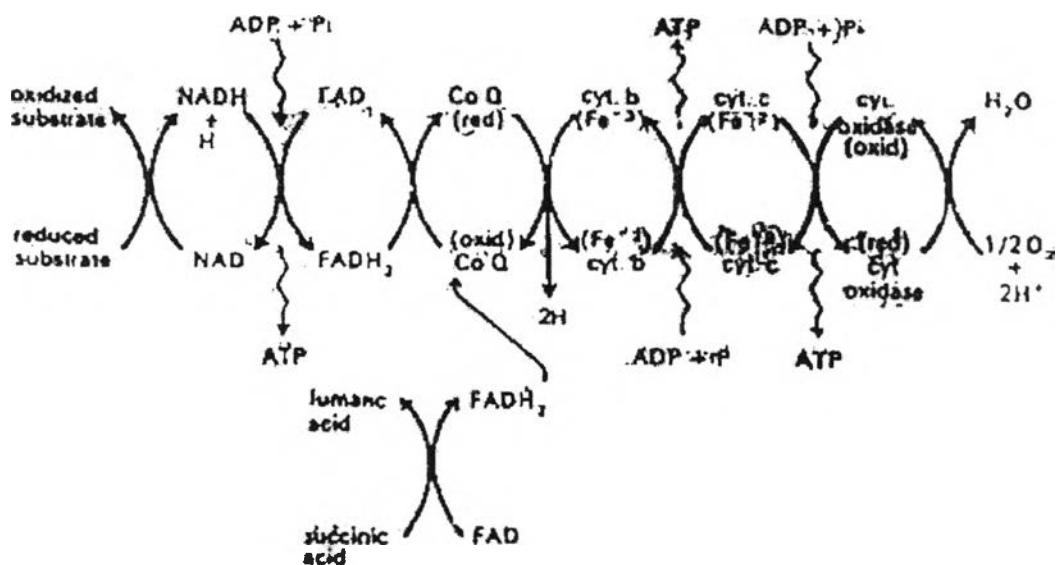
จากวัฏจักรเครบส์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น 4 ปฏิกิริยา แต่ละปฏิกิริยาเกี่ยวข้องกับ การสูญเสียอิเล็กตรอน 1 คู่ จากซีสเตรต อิเล็กตรอนทั้งหมด 4 คู่ จะถูกส่งผ่านไปในระบบการ ถ่ายทอดอิเล็กตรอนโดยมีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังสมการ



นอกจากนี้จากปฏิกิริยาออกซิเดตีฟคาร์บอกซิเลชันของกรดไอโซซิทริก และกรดแอลฟาคี โทกลูทาติกทำให้เกิดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาอีก 2 โมเลกุล ดังนั้นจากอะเซทิล โคเอ 1 โมเลกุล ผ่านวัฏจักรเครบส์ได้คาร์บอนไดออกไซด์ 2 โมเลกุล และน้ำ 2 โมเลกุล ดังสมการ



สารตัวกลางที่เกิดขึ้นในวัฏจักรเครบส์ อาจถูกดึงไปใช้เป็นสารเริ่มต้นหรือซีสเตรตในการ สร้างสารประกอบอื่น ๆ ที่สำคัญต่อพืชได้แก่ กรดอะมิโน กรดนิวคลีอิก ไขมัน โปรตีน คลอโรฟิลล์ และไซโทโครม เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 การเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนในลูกโซ่การหายใจ [44]

ก.3 ระบบการถ่ายทอดอิเล็กตรอน (Electron Transport System) หรือ ETS

ปฏิกิริยาสำคัญที่ทำให้เกิดพลังงานของกระบวนการหายใจแบบใช้ออกซิเจนคือปฏิกิริยาการถ่ายทอดอิเล็กตรอน ในระบบนี้ประกอบด้วยสารรับและส่งอิเล็กตรอนหลายชนิด ออกซิเจนมีความสามารถในการถูกรีดิวส์สูงสุด (รับอิเล็กตรอนจากสารอื่นได้ดี) การถ่ายทอดอิเล็กตรอนจะเป็นไปตามลำดับจากสารหนึ่งไปยังอีกสารหนึ่ง โดยมีเอ็นไซม์ควบคุมการถ่ายทอดอิเล็กตรอนในแต่ละขั้นตอน ดังรูปที่ ก.3 กระบวนการนี้เกิดขึ้นในเมทริกซ์ของไมโทคอนเดรีย (mitochondria)

การถ่ายทอดอิเล็กตรอนเริ่มต้นด้วยซัสเตรตที่ได้รับการรีดิวส์แล้วซึ่งเกิดขึ้นจากสารตัวกลางต่าง ๆ หลายชนิดในกระบวนการไกลโคไลซิสหรือวัฏจักรเครบส์ ได้แก่ 3-ฟอสโฟกลีเซอราลดีไฮด์ กรดไพรูวิก กรดไอโซซิทริก กรดกลูทาริกและกรดมาลิก ซัสเตรตจะถูกออกซิไดส์และผ่านอิเล็กตรอนเข้าไปในลูกโซ่การหายใจ (respiratory chain) หรือระบบการถ่ายทอดอิเล็กตรอน (ETS) ซึ่งประกอบด้วยสารรับส่งอิเล็กตรอนหลายชนิด ได้แก่ NADH, FADH₂, โคเอ็นไซม์คิว (CoQ) หรือ ยูบิควิโนน (Ubiquinone) ไซโตโครมบี (cyt.b) ไซโตโครมซี หนึ่ง (cyt.C₁) ไซโตโครมซี (cyt.C) ไซโตโครมเอ (cyt.A) ไซโตโครมเอ-3 (cyt.A₃) และสารตัวสุดท้ายที่จะรับอิเล็กตรอนคือออกซิเจน สำหรับไซโตโครมเอและไซโตโครมเอ-สาม ในสภาพจริงมักอยู่รวมกันไม่สามารถแยกออกจากกันได้จึงเรียกรวมว่าไซโตโครมออกซิเดส (cytochrom oxidase) ซึ่งต่างจากไซโตโครมชนิดอื่นเพราะประกอบด้วยโลหะถึง 2 ชนิดคือทองแดงและเหล็ก ซึ่งทองแดงสามารถเปลี่ยนรูประหว่างออกซิไดส์และรีดิวซ์ได้ (Cu⁺ หรือ Cu²⁺) เมื่อเกิดการสูญเสียหรือได้รับอิเล็กตรอน

ขั้นตอนแรกเมื่อซัสเตรตถูกออกซิไดส์ด้วย NAD⁺ จะให้ไฮโดรเจน 2 อะตอมประกอบด้วย 2 โปรตอน (2 H⁺) และ 2 อิเล็กตรอน (2 e⁻) ซึ่งจะรีดิวซ์ NAD⁺ เป็น NADH⁺ (การรีดิวซ์ NAD⁺ 1 โมเลกุลใช้ 2 e⁻ และ 1 H⁺ ดังนั้นจะเหลือ H⁺ 1 อนุภาค) NADH⁺ จะเก็บอิเล็กตรอนไว้ชั่วคราวเท่านั้นและจะถูกออกซิไดส์ต่อโดยเฟลวีนแอดินีนไดนิวคลีโอไทด์ (FAD) จะได้ NAD⁺ ในรูปออกซิไดส์กลับคืนมาพร้อม 2 H⁺ และ 2 e⁻ ซึ่งจะถูกส่งต่อไปรีดิวซ์ FAD ให้เป็น FADH₂ ถ้าซัสเตรตเป็นกรดซัคซินิก FAD จะรับอิเล็กตรอนจากกรดซัคซินิกโดยอาศัยกิจกรรมของเอ็นไซม์ซัคซินิกแอกซิดไฮโดรจีเนสโดยไม่ต้องผ่าน NAD⁺ จากการรีดิวซ์ FAD เป็น FADH₂ มีการปลดปล่อยพลังงาน ATP ออกมา 1 โมเลกุล FADH₂ ที่ได้จะไปรีดิวซ์ CoQ ได้ CoQH₂ และ FAD ใหม่ซึ่งพร้อมจะรับอิเล็กตรอนจาก NADH อีก สำหรับ CoQH₂ ซึ่งอยู่ในสภาพรีดิวซ์จะรับอิเล็กตรอนให้ cyt.b (Fe⁺³) ทำให้เปลี่ยนรูป cyt.b(Fe⁺³) ไปเป็น cyt.b(Fe⁺²) ในรูปรีดิวซ์พร้อมทั้งปลดปล่อย H⁺ 2 อนุภาค cyt.b(Fe⁺²) จะไปรีดิวซ์ cyt.c(Fe⁺³) ให้เป็น cyt.c(Fe⁺²) และมีการปลดปล่อย ATP 1 โมเลกุล ส่วน cyt.c(Fe⁺²) จะไปรีดิวซ์ไซโตโครมออกซิเดส (cyt.oxidase) พร้อมทั้งปลดปล่อย

ATP 1 โมเลกุล ในขั้นตอนสุดท้ายออกซิเจนจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจากไซโทโครมออกซิเดสและรวมตัวกับ 2H^+ เป็นน้ำ



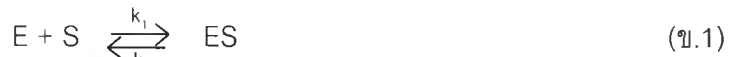
ดังนั้นระหว่างที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปตามลูกโซ่จากเฟลโวโปรตีนไปถึงออกซิเจน พลังงานอิสระที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิโดรีดักชัน (oxidoreduction) จะถูกนำไปใช้ในการสังเคราะห์ ATP ดังกล่าวเรียกว่าออกซิเดทีฟฟอสฟอริเลชัน (oxidative phosphorylation)

จากขั้นตอนที่ให้ 2H^+ และ 2e^- แก่ NAD^+ จะมีการส่งถ่ายอิเล็กตรอนตามลูกโซ่การหายใจไปจนถึงออกซิเจนซึ่งเป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย จะเกิดพลังงานที่นำไปสร้าง ATP 3 โมเลกุล ถ้าขั้นตอนนี้เป็นสารที่ให้ 2H^+ + 2e^- แก่ FAD พลังงานที่ได้จะมี ATP เกิดขึ้นเพียง 2 โมเลกุลเท่านั้น

จากกระบวนการหายใจแบบใช้ออกซิเจนโดยเริ่มจากน้ำตาลกลูโคส 1 โมเลกุล ปล่อยให้ปฏิกิริยาเกิดต่อเนื่องไปจนได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ พบว่าพลังงานที่ได้จากกระบวนการไกลโคไลซิสเท่ากับ $2\text{ATP} + 2\text{NADH}$ หรือเทียบเท่ากับ 8 ATP และจากการเปลี่ยนกรดไพรูวิก 2 โมเลกุล ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำจะได้พลังงานเทียบเท่ากับ 30 ATP ดังนั้นผลรวมทั้งหมดของพลังงานที่ได้จากกระบวนการหายใจแบบใช้ออกซิเจนเทียบเท่ากับ 38 ATP

ภาคผนวก ข กลไกการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์

ขบวนการหายใจเป็นเรื่องที่สลับซับซ้อนและมีการเปลี่ยนแปลงหลายขั้นตอน โดยในแต่ละขั้นตอนจะต้องใช้เอนไซม์หลายชนิดที่พืชสร้างขึ้นมาเพื่อควบคุมขบวนการแต่ละขั้นโดยเฉพาะ ดังนั้นภายในเซลล์จึงมีเอนไซม์เป็นจำนวนมาก เอนไซม์ (E) จะทำปฏิกิริยากับซับสเตรต (สารที่ถูกเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือ S) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนเอนไซม์ซับสเตรต (ES) ดังสมการ ข.1 แล้วจึงสลายได้ผลิตภัณฑ์ (P) และเอนไซม์ก็กลับคืนมาดังสมการ ข.2 โดยอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการเปลี่ยนสารประกอบเชิงซ้อนเอนไซม์ซับสเตรตไปเป็นผลิตภัณฑ์และเอนไซม์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคืออัตราเร็วในการเกิดผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของเอนไซม์ซับสเตรต



เมื่อ k_1, k_2, k_3 คือ ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยา

[E] คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ทั้งหมด

[ES] คือ ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเอนไซม์ซับสเตรต

[S] คือ ความเข้มข้นของซับสเตรตซึ่งมีค่ามากกว่า [E] มาก

อัตราเร็วของปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนเอนไซม์ซับสเตรต (ES) จาก $E + S$ คือ

$$\frac{d[ES]}{dt} = k_1[E][S] \quad (ข.3)$$

อัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของ ES คือ

$$-\frac{d[ES]}{dt} = k_2[ES] + k_3[ES] \quad (ข.4)$$

ที่สภาวะคงตัวจะได้ว่าอัตราเร็วในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (ES) เท่ากับอัตราเร็วในการสลายสารประกอบเชิงซ้อน (ES) ทำให้ [ES] คงที่และจะได้

$$\begin{aligned} k_1[E][S] &= k_2[ES] + k_3[ES] \\ k_1[E][S] &= [ES](k_2 + k_3) \end{aligned} \quad (ข.5)$$

จาก $[E_T] = [E] + [ES]$

เพราะฉะนั้น $[E] = [E_T] - [ES]$

แทนค่า $[E]$ ลงในสมการ (ข.5) จะได้

$$\frac{([E_T] - [ES])[S]}{[ES]} = \frac{k_2 + k_3}{k_1} = K_m \quad (ข.6)$$

ณ สภาวะคงตัว $[ES] = \frac{[E_T][S]}{K_m + [S]} \quad (ข.7)$

เมื่อ K_m คือ ค่าคงที่ไมเคิลลิสเมนเทน (Michaelis-Menten constant)

อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ (P) $R_p = k_3[ES] \quad (ข.8)$

อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด $V_m = k_3[E_T] \quad (ข.9)$

แทนสมการ (ข.7) ลงในสมการ (ข.8) จะได้

$$R_p = \frac{k_3[E_T][S]}{K_m + [S]} \quad (ข.10)$$

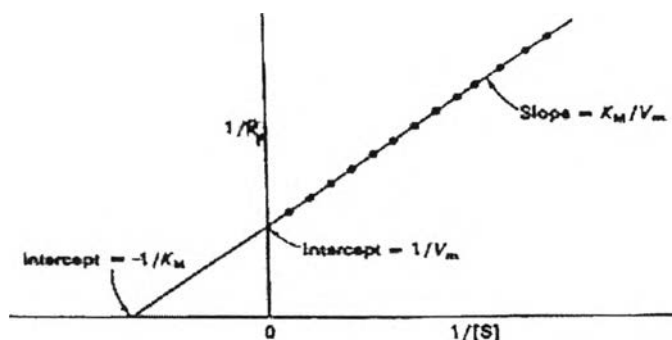
นำสมการ (ข.10) หารด้วยสมการ (ข.9) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{R_p}{V_m} &= \frac{k_3 \left(\frac{[E_T][S]}{k_3[E_T]} \right)}{K_m + [S]} \\ R_p &= \frac{V_m[S]}{K_m + [S]} \end{aligned} \quad (ข.11)$$

สมการนี้เรียกว่า สมการไมเคิลลิสเมนเทน (Michaelis-Menten) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยาและความเข้มข้นซับสเตรต เมื่อทราบ V_m และ K_m จัดรูปสมการ ข.11 ใหม่จะได้

$$\frac{1}{R_p} = \frac{K_m}{V_m} \frac{1}{[S]} + \frac{1}{V_m} \quad (ข.12)$$

เรียกสมการนี้ว่า สมการไลนวีเวอร์-เบอร์ก (Lineweaver-Burk equation) โดยสามารถหาค่า K_m และ V_m ได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/R_p$ และ $1/[S]$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ K_m/V_m และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/V_m$ ดังรูป



รูปที่ ข.1 กราฟหาค่า K_m และ V_m [11]

นอกจากนี้ในกระบวนการหายใจยังอาจมีสารบางชนิดเข้ามายับยั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ ซึ่งรูปแบบการยับยั้งในปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์เข้ามาเกี่ยวข้องสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

1) ปฏิกิริยาเอนไซม์ชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพทิทีฟ (uncompetitive)



ซับสเตรตจะทำปฏิกิริยากับตำแหน่งทำปฏิกิริยา (แหล่งกัมมันต์) ของเอนไซม์โดยที่ตัวยับยั้งจะไม่ทำปฏิกิริยากับแหล่งกัมมันต์โดยตรง แต่ตัวยับยั้งนี้จะทำปฏิกิริยากับซับสเตรตที่ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์แล้วทำให้ซับสเตรตที่ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ (P) ที่ต้องการได้

จากปฏิกิริยาข้างต้นสามารถเขียนอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$R_p = k_5[ES] \quad (\text{ข.16})$$

$$R_{ES} = k_1[E][S] - k_2[ES] - k_3[ES][I] + k_4[IES] - k_5[ES] \quad (\text{ข.17})$$

$$R_{IES} = k_3[I][ES] - k_4[IES] \quad (\text{ข.18})$$

จาก $[E_T] = [E] + [ES] + [IES] = [E+ES+IES] \quad (\text{ข.19})$

โดย $[E_T]$ คือ เอนไซม์ทั้งหมดที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้

ดังนั้น $[E] = [E_T] - [ES] - [IES] = [E_T - ES - IES] \quad (\text{ข.20})$

เมื่อใช้สมมติฐานว่ามีการเข้าสู่สภาวะคงตัวแบบเทียม (Pseudo steady state hypothesis, PSSH)

$$R_{ES} = R_{IES} = 0 \quad (\text{ข.21})$$

ดังนั้น สมการ (ข.17) จะเป็นหลังแทนค่าด้วยสมการ ข.20

$$0 = k_1[E][S] - k_2[ES] - k_3[I][ES] + k_4[IES] - k_5[ES] \quad (\text{ข.22})$$

$$0 = k_1[E_T - ES - IES][S] - k_2[ES] - k_3[I][ES] + k_4[IES] - k_5[ES] \quad (\text{ข.23})$$

เมื่อแทนสมการ (ข.20) ลงในสมการ (ข.23) จะได้

$$k_1[E_T - ES - IES][S] = k_2[ES] + k_3[I][ES] - k_4[IES] + k_5[ES] \quad (\text{ข.24})$$

$$k_1[E_T - ES - IES][S] = (k_2 + k_3[I] + k_5)[ES] - k_4[IES] \quad (\text{ข.25})$$

$$[E_T - ES - IES] = ((k_2 + k_3[I] + k_5)/k_1[S])[ES] - k_4[IES]/(k_1[S]) \quad (\text{ข.26})$$

จากสมการ (ข.18) เมื่อสมมติ PSSH จะได้

$$0 = k_3[I][ES] - k_4[IES] \quad (\text{ข.27})$$

$$k_4[IES] = k_3[I][ES] \quad (\text{ข.28})$$

$$[IES] = (k_3/k_4)[I][ES] \quad (\text{ข.29})$$

แทนสมการ (ข.29) ลงในสมการ (ข.26) จะได้

$$[E_T] - [ES] - (k_3/k_4)[I][ES] = ((k_2 + k_3[I] + k_5)/k_1[S])[ES] - (k_3[I][ES])/k_1[S] \quad (\text{ข.30})$$

$$[E_T] - [ES] - (k_3/k_4)[I][ES] = ((k_2 + k_3[I] + k_5 - k_3[I])/k_1[S])[ES] \quad (\text{ข.31})$$

$$[E_T] - [ES] - (k_3/k_4)[I][ES] = ((k_2 + k_5)/k_1[S])[ES] \quad (\text{ข.32})$$

$$[E_T] - [ES] = \left(\frac{k_2 + k_5}{k_1[S]} + \frac{k_3}{k_4}[I] \right) [ES] \quad (\text{ข.33})$$

$$[E_T] = \left(1 + \frac{k_2 + k_5}{k_1[S]} + \frac{k_3}{k_4}[I] \right) [ES] \quad (\text{ข.34})$$

แทนสมการ (ข.34) ลงในสมการ (ข.16) จะได้ว่า

$$R_p = \frac{k_5[E_T]}{1 + \frac{k_2 + k_5}{k_1[S]} + \frac{k_3}{k_4}[I]} \quad (\text{ข.35})$$

เมื่อนำ [S] มาคูณทั้งเศษและส่วนของสมการ (ข.35) จะได้

$$R_p = \frac{k_5[E_T][S]}{k_1 + [S] \left(1 + \frac{k_3}{k_4}[I] \right)} \quad (\text{ข.36})$$

กำหนดให้

$$V_m = k_5[E_T] \quad (ข.37)$$

$$K_m = (k_2 + k_3)/k_1 \quad (ข.38)$$

$$K_i = k_4/k_3 \quad (ข.39)$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (ข.36)

$$R_p = \frac{V_m [S]}{K_m + [S] \left(1 + \frac{[I]}{K_i} \right)} \quad (ข.40)$$

สมการ (ข.40) ถูกเรียกว่าสมการไมเคิลลิสเมนเทนชนิดที่มีการยับยั้งแบบอันคอมเพทิทีฟ

2) ปฏิกริยาเอนไซม์ชนิดที่มีการยับยั้งแบบอนคอมเพทิทีฟ (noncompetitive)



ในแบบนี้ มีแนวความคิดว่าเอนไซม์มีแหล่งกัมมันต์ 2 ประเภท คือสำหรับซับสเตรทและสำหรับตัวยับยั้ง ซับสเตรทและตัวยับยั้งต่างทำปฏิกริยากับเอนไซม์บนแหล่งกัมมันต์ของตัวเอง แต่สารเชิงซ้อนของเอนไซม์กับซับสเตรทสามารถทำปฏิกริยากับตัวยับยั้งได้ด้วย ในทำนองเดียวกัน สารเชิงซ้อนเอนไซม์กับตัวยับยั้งสามารถทำปฏิกริยากับซับสเตรทได้เช่นกัน ทำให้สูญเสียซับสเตรทสำหรับทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ จากปฏิกริยาข้างต้นสามารถเขียนอัตราการเกิดปฏิกริยาได้ดังต่อไปนี้

ถ้าพิจารณาที่ละปฏิกริยา (โดยการหาอัตราการเกิดปฏิกริยานี้จะสมมติว่า $k_p \ll k_1, k_2, k_3, k_4$) จะสามารถเขียนอัตราการเกิดปฏิกริยาแต่ละปฏิกริยาได้ดังนี้ สำหรับปฏิกริยาที่ 5 (สมการ (ข.45))

$$R_p = k_p[ES] \quad (ข.46)$$

สำหรับปฏิกิริยาที่ 1 (สมการ (ข.41))

$$R_1 = k_1([E][S] - ([ES]/K_s)) \quad (ข.47)$$

ถ้า $R_1/k_1 \approx 0$ สภาวะคงตัวแบบเทียม (Pseudo steady state hypothesis, PSSH) จะได้ว่า

$$[ES] = K_s[E][S] \quad (ข.48)$$

สำหรับปฏิกิริยาที่ 2 (สมการ (ข.42))

$$R_2 = k_2([E][I] - ([EI]/K_i)) \quad (ข.49)$$

ถ้า $R_2/k_2 \approx 0$ (PSSH) จะได้ว่า

$$[EI] = K_i[E][I] \quad (ข.50)$$

สำหรับปฏิกิริยาที่ 3 (สมการ (ข.43))

$$R_3 = k_3([ES][I] - ([IES]/K'_i)) \quad (ข.51)$$

ถ้า $R_3/k_3 \approx 0$ (PSSH) จะได้ว่า

$$[IES] = K'_i[ES][I] \quad (ข.52)$$

สำหรับปฏิกิริยาที่ 4 (สมการ (ข.44))

$$R_4 = k_4([EI][S] - ([IES]/K'_s)) \quad (ข.53)$$

ถ้า $R_4/k_4 \approx 0$ (PSSH) จะได้ว่า

$$[IES] = K'_s[EI][S] \quad (ข.54)$$

และจาก

$$[E_T] = [E] + [ES] + [EI] + [IES] \quad (ข.55)$$

แทนด้วยสมการ (ข.48), (ข.50) และ (ข.42) จะได้ว่า

$$[E_T] = [E] + K_s[E][S] + K_i[E][I] + K'_i[ES][I] \quad (ข.56)$$

$$[E_T] = [E] + K_s[E][S] + K_i[E][I] + K'_i K_s[E][S][I] \quad (ข.57)$$

$$[E] = \frac{[E_T]}{1 + K_s[S] + K_i[I] + K'_i K_s[S][I]} \quad (ข.58)$$

นำสมการ ข.58 แทนลงในสมการ ข.48 จะได้ว่า

$$[ES] = \frac{K_s k_p [E_T][S]}{1 + K_s[S] + K_i[I] + K'_i K_s[S][I]} \quad (ข.59)$$

และแทนลงในสมการ ข.46 จะได้

$$R_p = \frac{K_s k_p [E_T][S]}{1 + K_s[S] + K_i[I] + K_s K_i[S][I]} \quad (\text{ข.60})$$

แต่เนื่องจาก $K_s = K_s$ และ $K_i = K_i$ ดังนั้น

$$R_p = \frac{K_s k_p [E_T][S]}{1 + K_s[S] + K_i[I] + K_i K_s[S][I]} \quad (\text{ข.61})$$

เมื่อหารด้วย K_s ทั้งสมการจะพบว่า

$$R_p = \frac{k_p [E_T][S]}{\frac{1}{K_s} + [S] + \frac{K_i}{K_s} [I] + K_i [S][I]} \quad (\text{ข.62})$$

$$\text{เมื่อให้ } K_m = 1/K_s \quad (\text{ข.63})$$

$$K_i = 1/K_i \quad (\text{ข.64})$$

$$V_m = k_p [E_T] \quad (\text{ข.65})$$

จะได้สมการอัตราการศึกษาเกิดปฏิกิริยาเป็น

$$R = \frac{V_m [S]}{([S] + K_m)(1 + \frac{[I]}{K_i})} \quad (\text{ข.66})$$

สมการ (ข.66) ถูกเรียกว่าสมการไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพทิทีฟ

3) ปฏิกิริยาเอนไซม์ชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพทิทีฟ (competitive)



ซับสเตรทและตัวยับยั้งต่างจะแย่งเข้าทำปฏิกิริยากับเอนไซม์บนแหล่งกัมมันต์ จากปฏิกิริยาข้างต้นสามารถเขียนอัตราการศึกษาเกิดปฏิกิริยาได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$R_p = k_5 [ES] \quad (\text{ข.70})$$

$$R_{ES} = k_1 [E][S] - k_2 [ES] - k_5 [ES] \quad (\text{ข.71})$$

$$R_{EI} = k_3 [E][I] - k_4 [EI] \quad (\text{ข.72})$$

$$\text{จาก } [E_T] = [E + ES + EI] = [E_T] + [ES] + [EI] \quad (\text{ข.73})$$

ดังนั้น $[E] = [E_T - ES - EI] = [E_T] - [ES] - [EI]$ (ข.74)

เมื่อใช้สมมติฐานว่ามีการเข้าสู่ภาวะคงตัวแบบเทียม (Pseudo steady state hypothesis, PSSH)

$$R_{ES} = R_{EI} = 0 \quad (\text{ข.75})$$

ดังนั้น จากสมการ (ข.71) เมื่อสมมติ PSSH จะกลายเป็น

$$0 = k_1[E_T - ES - EI][S] - k_2[ES] - k_5[ES] \quad (\text{ข.76})$$

$$[E_T - ES - EI] = ((k_2 + k_5)/k_1[S])[ES] \quad (\text{ข.77})$$

จากสมการ (ข.72) เมื่อสมมติ PSSH จะได้

$$0 = k_3[E_T - ES - EI][I] - k_4[EI] \quad (\text{ข.78})$$

$$[E_T - ES - EI] = k_4[EI]/k_3[I] = ((k_2 + k_5)/k_1[S])[ES] \quad (\text{ข.79})$$

ดังนั้น

$$[EI] = \left(\frac{k_2 + k_5}{k_1} \right) \frac{k_3 [I]}{k_4 [S]} [ES] \quad (\text{ข.80})$$

แทนสมการ (ข.80) ลงในสมการ (ข.79) จะได้ว่า

$$[ES] = \frac{[E_T][S]}{[S] + \left(\frac{k_2 + k_5}{k_1} \right) \left(1 + \frac{k_3 [I]}{k_4} \right)} \quad (\text{ข.81})$$

แทนสมการ (ข.81) ลงในสมการ (ข.70) จะได้ว่า

$$R_p = \frac{k_5 [E_T][S]}{[S] + \left(\frac{k_2 + k_5}{k_1} \right) \left(1 + \frac{k_3 [I]}{k_4} \right)} \quad (\text{ข.82})$$

ถ้ากำหนดให้

$$V_m = k_5 [E_T] \quad (\text{ข.83})$$

$$K_m = (k_2 + k_5)/k_1 \quad (\text{ข.84})$$

$$K_i = k_4/k_3 \quad (\text{ข.85})$$

ดังนั้น

$$R = \frac{V_m [S]}{[S] + K_m \left(1 + \frac{[I]}{K_i} \right)} \quad (\text{ข.86})$$

สมการ (ข.86) ถูกเรียกว่าสมการไมเคิลลิส-เมนเทนชนิดที่มีการยับยั้งแบบคอมเพทิทีฟ

ภาคผนวก ค

การโปรแกรมเชิงเส้นตรง

การโปรแกรมเชิงเส้นตรง (Linear Programming) เป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่มีความสำคัญมากเทคนิคหนึ่ง ในการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นตรงที่มีจำนวนตัวแปรมากและมีคำตอบหลายคำตอบ การโปรแกรมเชิงเส้นตรง หมายถึง การวางแผนโดยการใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ เพื่อสามารถจัดทรัพยากร (ตัวแปร) ที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้ [26] ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค.1 ตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นตรง

วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น คือ การหาค่าตัวแปรตัดสินใจ (variable) (x_1, x_2, \dots, x_n) เพื่อให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) มีค่าสูงสุดหรือต่ำสุด ภายใต้ขีดจำกัดหรือฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraint function) ที่เป็นสมการมากกว่าหรือเท่ากับ น้อยกว่าหรือเท่ากับ หรือเท่ากับ ซึ่งตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นสำหรับการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุด สามารถเขียนเป็นตัวแบบทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ [26, 27]

$$\text{ฟังก์ชันวัตถุประสงค์} \quad Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (\text{ค.1})$$

$$\text{ฟังก์ชันข้อจำกัด} \quad a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1 \quad (\text{ค.2})$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2 \quad (\text{ค.3})$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots$$
$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m \quad (\text{ค.4})$$

$$x_j \geq 0$$

เมื่อ Z = ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

c_j = กำไรหรือต้นทุนต่อหน่วยหรือค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรตัดสินใจในฟังก์ชันวัตถุประสงค์

a_{ij} = ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรตัดสินใจในฟังก์ชันข้อจำกัด

x_j = ตัวแปรที่ใช้ในการตัดสินใจ

b_i = ค่าคงที่แสดงจำนวนทรัพยากรชนิดที่ i ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดในฟังก์ชันข้อจำกัด

i = 1, 2, ..., m

j = 1, 2, ..., n

ค.2 ส่วนประกอบของตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้น [27]

1. ตัวแปรตัดสินใจ (variable) หมายถึง ตัวแปรเพื่อแสดงปริมาณ จำนวนที่เป็นทางเลือกของปัญหาที่ต้องการตัดสินใจ หรือเป็นปริมาณที่ต้องการคำนวณเพื่อหาค่าที่เหมาะสม
2. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) หมายถึง สมการเชิงเส้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางด้านกำไรสูงสุดหรือต้นทุนต่ำสุด ซึ่งสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการกำไรสูงสุดหรือต้นทุนต่ำสุด คือกำไรต่อหน่วยหรือต้นทุนต่อหน่วย [26] ตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นจะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียงฟังก์ชันเดียวเท่านั้น ในกรณีที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากกว่า 1 วัตถุประสงค์ สามารถแก้ปัญหาได้โดยการใช้โปรแกรมเป้าหมาย (Goal programming) [27]
3. ฟังก์ชันข้อจำกัด (constraint function) หมายถึง สมการหรืออสมการเชิงเส้นที่บอกให้ทราบถึงความสัมพันธ์จำกัดสำหรับปัญหาที่พิจารณา
4. ตัวแปรตัดสินใจทุกตัวจะต้องไม่เป็นค่าลบ ตัวแปรตัดสินใจจะมีความมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ ซึ่งตรงกับสภาพความเป็นจริง

ค.3 วิธีการแก้ปัญหการโปรแกรมเชิงเส้น [27]

การแก้ปัญหการโปรแกรมเชิงเส้นสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนหลัก ๆ ได้ 2 ขั้นตอน คือ การสร้างตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นและการหาค่าตอบจากตัวแบบ ซึ่งการหาค่าตอบจากตัวแบบที่สร้างขึ้นมีวิธีต่าง ๆ ดังนี้

สำหรับปัญหาที่มี 2 ตัวแปร วิธีที่ใช้ประกอบด้วย

1. วิธีกำจัดจำนวนของคำตอบ (direct elimination method)
2. วิธีอนุมานทางคณิตศาสตร์ (mathematical deduction method)
3. วิธีกราฟ (graphical method)

สำหรับปัญหาที่มีมากกว่า 2 ตัวแปร วิธีที่ใช้ประกอบด้วย

4. วิธีพีชคณิต (algebraic method)
5. วิธีซิมเพล็กซ์ (simplex method)

วิธีการที่นิยมใช้กันมากสำหรับการแก้ปัญหการโปรแกรมเชิงเส้นที่มี 2 ตัวแปรคือวิธีกราฟ แต่ปัญหาโดยทั่วไปจะมีตัวแปรมากกว่า 2 ตัวแปร ซึ่งวิธีที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย คือวิธีซิมเพล็กซ์

เนื่องจากตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นตรงในงานวิจัยนี้เป็นการหาต้นทุนต่ำสุดในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และมีตัวแปรมากกว่า 2 ตัวแปร ดังนั้นจึงอธิบายวิธีการหาค่าตอบที่เหมาะสม (หรือค่า

ของตัวแปรที่เหมาะสม) สำหรับทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าต่ำสุดด้วยวิธีซิมเพล็กซ์ แต่เพื่อให้เกิดความเข้าใจได้ดีขึ้น จึงขอกล่าวถึงการใช่วิธีกราฟสำหรับระบบที่มีตัวแปร 2 ตัวเพื่อเป็นแนวทางในการเข้าใจวิธีซิมเพล็กซ์มากขึ้น

ค.4 การหาคำตอบโดยวิธีกราฟ [26]

วิธีกราฟเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดที่จะทำให้เห็นภาพของกระบวนการหาคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์และการประยุกต์การโปรแกรมเชิงเส้น

การหาคำตอบโดยวิธีกราฟสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 เขียนกราฟของฟังก์ชันข้อจำกัด

ขั้นตอนที่ 2 เขียนกราฟของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณคำตอบที่ดีที่สุด

สมมติตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นตรง มีดังนี้

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำสุด $Z = 30x_1 + 70x_2$

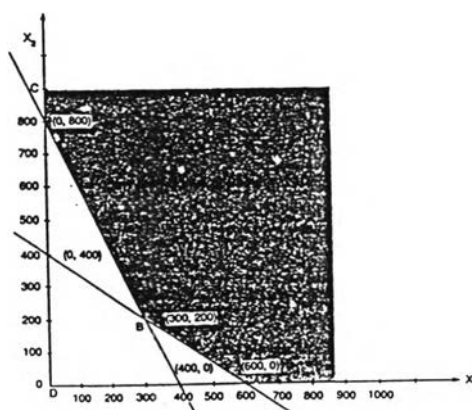
ฟังก์ชันข้อจำกัด $2x_1 + x_2 \geq 800$

$2x_1 + 3x_2 \geq 1200$

$x_1, x_2 \geq 0$

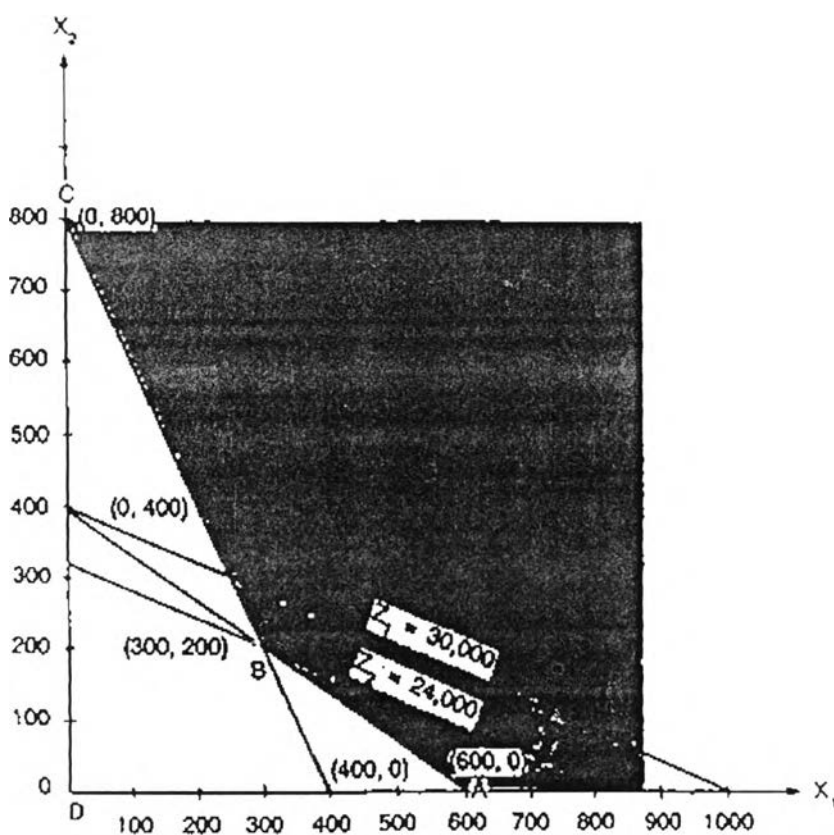
วิธีทำ

- นำฟังก์ชันข้อจำกัดไปเขียนกราฟเพื่อหาพื้นที่ที่หาคำตอบได้ (Feasible region)

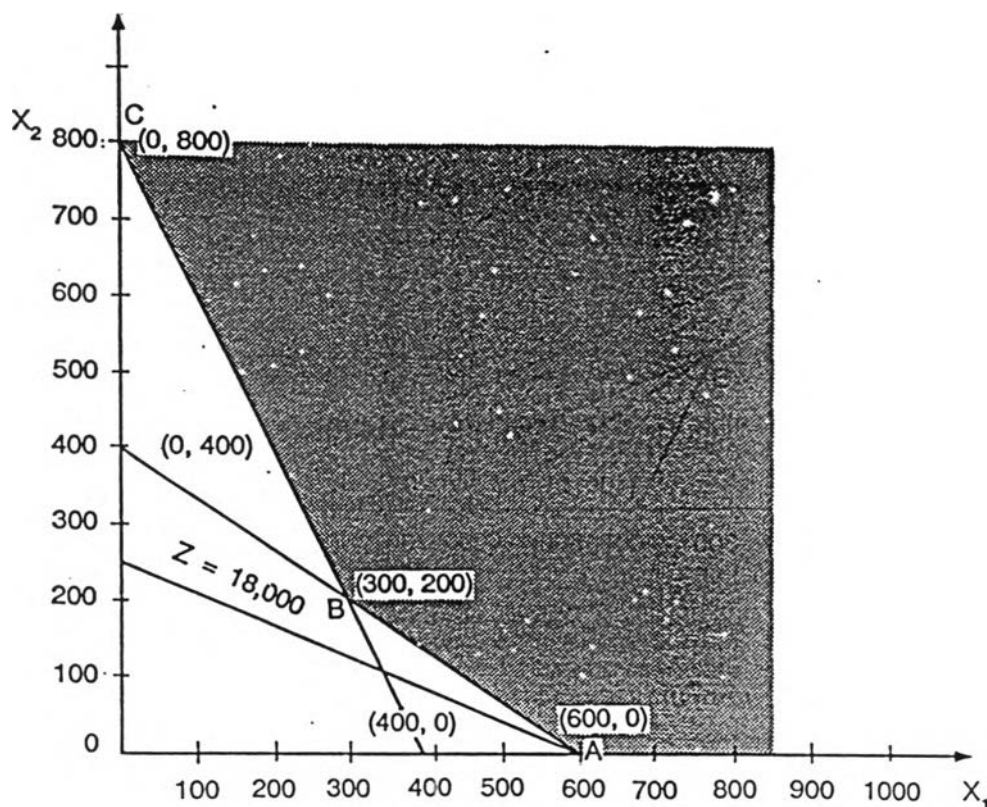


รูปที่ ค.1 พื้นที่ที่หาคำตอบ (feasible region) ได้ภายใต้ฟังก์ชันข้อจำกัด

2. เขียนกราฟฟังก์ชันวัตถุประสงค์ การเขียนกราฟฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่ดีที่สุด เพื่อให้มีต้นทุนต่ำสุดภายใต้ข้อจำกัดที่มีอยู่ ทำได้โดยสมมติให้ต้นทุนมีค่าเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่ง แล้วลดต้นทุนลงเรื่อย ๆ และเมื่อเส้นต้นทุนนี้ผ่านจุดสุดท้ายของพื้นที่ที่หาค่าตอบได้ที่จุดสุดท้าย จุดใด จุดนั้นคือจุดที่ให้คำตอบที่ดีที่สุด ดังรูปที่ ค.2 เมื่อเขียนกราฟฟังก์ชันวัตถุประสงค์ Z_1 และ Z_2 แล้วจะเห็นว่า ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าลดลงเมื่อเส้นต้นทุนเคลื่อนเข้าใกล้จุดกำเนิด จึงเคลื่อนเส้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้เข้าใกล้จุดกำเนิดไปเรื่อย ๆ ตามเท่าที่มีอยู่ในพื้นที่ที่หาค่าตอบได้ จนกระทั่งเส้นฟังก์ชันในวัตถุประสงค์ไปตัดพื้นที่ที่หาค่าตอบได้ที่จุดสุดท้ายซึ่งคือจุด A ดังนั้นจุด A จึงเป็นจุดที่ให้คำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งจุด A คือจุดที่ $x_1 = 600$ และ $x_2 = 0$ และทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $Z = 18000$ ดังรูปที่ ค.3



รูปที่ ค.2 เส้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เมื่อ $Z_1 = 30,000$ และ $Z_2 = 24,000$



รูปที่ ค.3 ค่าตอบที่ดีที่สุดเมื่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นค่าต่ำสุด

จะเห็นได้ว่าคำตอบที่ดีที่สุดจะอยู่ที่จุดยอด (extreme point) ของพื้นที่ที่หาคำตอบได้ ซึ่งเป็นจริงเสมอ

ค.5 การหาคำตอบโดยวิธีซิมเพล็กซ์

การแก้ปัญหาค่าเหมาะเชิงเส้นตรงด้วยวิธีการที่เหมาะสมสำหรับปัญหาที่มีตัวแปรสองตัว แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นในโลกแห่งความเป็นจริง จำนวนตัวแปรและจำนวนฟังก์ชันข้อจำกัดมีจำนวนมาก วิธีการคำนวณที่สามารถแก้ปัญหาค่าเหมาะเชิงเส้นที่มีขนาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือวิธีซิมเพล็กซ์

ในการแก้ปัญหาค่าเหมาะเชิงเส้นด้วยวิธีซิมเพล็กซ์ ต้องทำการแปลงฟังก์ชันข้อจำกัดทั้งหมดให้อยู่ในรูปสมการตัวแบบมาตรฐานสำหรับวิธีซิมเพล็กซ์ซึ่งมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. สมการข้อจำกัดทุกสมการจะต้องมีค่าทางขวามือของสมการเป็นค่าบวกเสมอ (จะมีค่าลบไม่ได้)
2. ตัวแปรทุกตัวจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์
3. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์อาจเป็นการหาค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุดก็ได้

รายละเอียดในการปรับฟังก์ชันข้อจำกัดให้อยู่ในรูปตัวแบบมาตรฐานสำหรับวิธีซิมเพล็กซ์ มีหลักการดังนี้

1. สำหรับฟังก์ชันซึ่งอยู่ในรูปของสมการ สามารถทำให้อยู่ในรูปสมการโดยการลบหรือบวกด้วยตัวแปรตัวหนึ่งตั้งนี้ถ้าเป็นสมการน้อยกว่าหรือเท่ากับให้บวกทางซ้ายของฟังก์ชันด้วยตัวแปรสแลค (slag variable) ถ้าเป็นสมการมากกว่าหรือเท่ากับให้ลบทางซ้ายของฟังก์ชัน เรียกตัวแปรนี้ว่า ตัวแปรเซอร์พลัส (surplus variable) และบวกด้วยตัวแปรเทียม (artificial variables) เพื่อให้สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมได้

2. สำหรับกรณีที่ค่าคงที่ (b) ของสมการข้อจำกัดมีค่าเป็นลบ สามารถทำให้เป็นบวกได้โดยการนำ -1 คูณตลอด

3. การเปลี่ยนข้างของสมการจากมากกว่าหรือเท่ากับไปเป็นน้อยกว่าหรือเท่ากับ หรือจากน้อยกว่าหรือเท่ากับเป็นมากกว่าหรือเท่ากับ สามารถทำได้โดยการนำ -1 คูณตลอดฟังก์ชัน

ตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นดังสมการ (ค.1) - (ค.4) สามารถปรับให้อยู่ในรูปตัวแบบมาตรฐานได้ดังสมการ (ค.1, ค.5 - ค.7) ดังนี้

$$\text{ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (\text{ค.1})$$

$$\text{ฟังก์ชันข้อจำกัด } a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + s_1 = b_1 \quad (\text{ค.5})$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n + s_2 = b_2 \quad (\text{ค.6})$$

$$\vdots$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n + s_m = b_m \quad (\text{ค.7})$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$$

โดยที่ S_i คือ ตัวแปรสแลค (slag variable)

ขั้นตอนวิธีซิมเพล็กซ์

ค.5.1 การสร้างตารางเริ่มต้น

สัมประสิทธิ์ของ ตัวแปรในฟังก์ชัน วัตถุประสงค์	ตัวแปร เบสิค	สมการข้อจำกัด	ค่าตอบ	สมการข้อจำกัด									
c_j				c_1	c_2	c_3	...	c_n	0	0	0	...	0
				x_1	x_2	x_3	...	x_n	s_1	s_2	s_3	...	s_m
0	s_1	b_1		a_{11}	a_{12}	a_{13}	...	a_{1n}	1	0	0	...	0
0	s_2	b_2		a_{21}	a_{22}	a_{23}	...	a_{2n}	0	1	0	...	0
0	s_3	b_3		a_{31}	a_{32}	a_{33}	...	a_{3n}	0	0	1	...	0
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0	s_m	b_m		a_{m1}	a_{m2}	a_{m3}		a_{mn}	0	0	0	...	1
ค่า Z													
	z_j	0		0	0	0	...	0	0	0	0	...	0
	$c_j - z_j$			c_1	c_2	c_3	...	c_n	0	0	0	...	0

ค่าในแถว z_j คือ ผลบวกของผลคูณระหว่างสัมประสิทธิ์ของตัวแปรเบสิคในสมการ c_j กับค่าในสมการ j ที่อยู่ในแถวเดียวกัน

$c_j - z_j$ คือ เป็นแถวที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกตัวแปรเบสิคตัวถัดไปที่จะอยู่ในคำตอบและบอกถึงสภาพการได้คำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งเท่ากับผลต่างระหว่างค่า c_j กับ z_j ที่อยู่ในสมการเดียวกัน ค่าในแถว $c_j - z_j$ ของสมการใด ๆ จะแสดงถึงค่าที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่อหนึ่งหน่วยตัวแปร เมื่อให้ตัวแปรในสมการนั้นเป็นตัวแปรเบสิค

หลังจากสร้างตารางเริ่มต้นแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการพัฒนาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดซึ่งมีอยู่ 3 ขั้นตอน คือ

1. การตรวจสอบคำตอบที่ได้จากตารางซิมเพล็กซ์ว่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุดแล้วหรือไม่
2. การเลือกตัวแปรเข้าเป็นตัวแปรเบสิค และการเลือกตัวแปรออกจากชุดตัวแปรเบสิค
3. การปรับปรุงตารางซิมเพล็กซ์เพื่อหาคำตอบใหม่ต่อไป

ค.5.2 การตรวจสอบคำตอบที่ดีที่สุด

1. พิจารณาค่าในแถว $c_j - z_j$ ถ้าค่าในแถวนี้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ทั้งหมดแสดงว่าคำตอบจากตารางซิมเพล็กซ์เป็นคำตอบที่ดีที่สุด แต่ถ้ายังมี $c_j - z_j$ ค่าใดที่น้อยกว่าศูนย์แสดงว่าจำเป็นต้องปรับค่าเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด

2. การเลือกตัวแปรเข้าเป็นตัวแปรเบสิค

เลือกตัวแปรเข้าที่เป็นตัวแปรเบสิค คือ ตัวแปรใด ๆ ที่อยู่ตรงกับค่าของ $c_j - z_j$ ที่มีค่าน้อยที่สุด (ค่าลบมากที่สุด) เพื่อให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าต่ำลงเร็วที่สุด

3. การเลือกตัวแปรออกจากชุดตัวแปรเบสิค

ในการเลือกตัวแปรออกจากชุดตัวแปรเบสิค จะต้องเพิ่มสมมติในตารางซิมเพล็กซ์อีก 1 สมมติโดยค่าสมมติที่เพิ่มเข้ามาใหม่นี้เกิดจากการนำเอาค่าในสมมติคำตอบหารด้วยค่าในสมมติของตัวแปรซึ่งเพิ่งจะถูกเลือกเข้าเป็นตัวแปรเบสิค เรียกสมมตินี้ว่า สมมติขจัดเบสิค ค่านี้จะแสดงจำนวนหน่วยสูงสุดที่ตัวแปรเบสิคตัวใหม่จะมีค่าได้ ตัวแปรที่จะถูกนำออกจากชุดตัวแปรเบสิคคือ ตัวแปรที่อยู่ตรงกับค่าสมมติขจัดเบสิคที่มีค่าบวกน้อยที่สุด เพราะไม่ทำให้เงื่อนไขฟังก์ชันข้อจำกัดถูกทำลายไป (ค่าตัวแปรน้อยกว่าศูนย์)

4. การปรับปรุงตารางซิมเพล็กซ์

หลังจากเลือกตัวแปรเข้าและตัวแปรออกได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการทำให้อุดตันระหว่างสมมติและแถวที่เป็นตัวแปรเบสิคเดียวกัน จะต้องมีค่าเป็น 1 ส่วนค่าอื่น ๆ ในสมมติของตัวแปรซึ่งเป็นตัวแปรเบสิคจะต้องมีค่าเท่ากับ 0 รายละเอียดของวิธีการสามารถศึกษาได้ดังในตัวอย่างที่ 1

5. พิจารณาตามขั้นตอนที่ 1 อีกครั้ง เพื่อตรวจสอบว่าได้คำตอบที่ดีที่สุดหรือยัง ดังแสดงในตัวอย่างที่ 1

ตัวอย่างที่ 1

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำสุด

$$Z = 3000x_1 + 8000x_2$$

ฟังก์ชันข้อจำกัด

$$x_1 - x_2 = 200$$

$$x_1 \leq 80$$

$$x_2 \geq 60$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

แปลงให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐานซิมเพล็กซ์

$$Z = 3000x_1 + 8000x_2 \quad (\text{ค.8})$$

$$x_1 + x_2 + d_1 = 200 \quad (\text{ค.9})$$

$$x_1 + s_1 = 80 \quad (\text{ค.10})$$

$$x_2 - s_2 + d_2 = 60 \quad (\text{ค.11})$$

โดยที่ s_1 คือ ตัวแปรสแลค (slag variable)

d_1, d_2 คือ ตัวแปรเทียม (artificial variable)

ในฟังก์ชันข้อจำกัดจะต้องใช้เทคนิคในการให้ตัวแปรเทียมกับสมการ (ค.9) และ (ค.11) เพื่อให้สามารถดำเนินขั้นตอนต่อไปได้ซึ่งจะใช้กับฟังก์ชันข้อจำกัดมากกว่าเท่ากับและฟังก์ชันข้อจำกัดเท่ากับ หลังจากนั้นจึงใช้เทคนิค Two-phase เข้ามาช่วยในการแก้ไขปัญหาโดยวิธี Two-phase แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ

เฟส 1 เป็นขั้นตอนที่พยายามลดค่าตัวแปรเทียมให้มีค่าเป็นศูนย์ ถ้าไม่สามารถทำให้มีค่าเป็นศูนย์ได้ แสดงว่าปัญหานี้ไม่มีคำตอบ

เฟส 2 หลังจากผ่านเฟส 1 แล้ว จะดำเนินการเฟส 2 เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด

พิจารณาสมการ (ค.8) - (ค.11) กำหนดให้ Z' เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่โดย

$$Z' = d_1 + d_2 \quad (\text{ค.9})$$

นำสมการ (ค.6) รวมกับสมการ (ค.8) จะได้

$$d_1 + d_2 = 260 - x_1 - 2x_2 + s_2 \quad (\text{ค.10})$$

แทนสมการ (ค.10) ลงในสมการ (ค.9) จะได้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่ดังนี้

$$Z' = -x_1 - 2x_2 + s_2 + 260 \quad (\text{ค.11})$$

ดังนั้นรูปแบบระบบสมการในเฟส 1 สามารถสรุปได้ดังนี้

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

$$Z' = -x_1 - 2x_2 + s_2 + 260$$

ฟังก์ชันข้อจำกัด

$$x_1 + x_2 + d_2 = 200$$

$$x_1 + s_1 = 80$$

$$x_2 - s_2 + d_1 = 60$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

สร้างตารางซิมเพล็กซ์เริ่มต้น

ขั้นตอนที่ 1

c_j	ตัวแปร	คำตอบ	-1	-2	0	1	0	0
	เบสิค	260	x_1	x_2	s_1	s_2	d_1	d_2
0	d_2	200	1	1	0	0	0	1
0	s_1	80	1	0	1	0	0	0
0	d_1	60	0	1	0	-1	1	0
	z_j	260	0	0	0	0	0	0
	$c_j - z_j$		-1	-2	0	1	0	0

โดยที่ $z_1 = 260 + (0)(200) + (0)(80) + (0)(60) = 260$

$$z_2 = (0)(1) + (0)(1) + (0)(0) = 0$$

$$z_3 = (0)(1) + (0)(0) + (0)(1) = 0$$

$$z_4 = (0)(0) + (0)(1) + (0)(0) = 0$$

$$z_5 = (0)(0) + (0)(0) + (0)(-1) = 0$$

$$z_6 = (0)(0) + (0)(0) + (0)(1) = 0$$

$$z_7 = (0)(1) + (0)(0) + (0)(0) = 0$$

และ $c_2 - z_2 = (-1) - 0 = -1$

$$c_3 - z_3 = (-2) - 0 = -2$$

$$c_4 - z_4 = 0 - 0 = 0$$

$$c_5 - z_5 = 1 - 0 = 1$$

$$c_7 - z_7 = 0 - 0 = 0$$

$$c_3 - z_3 = 0 - 0 = 0$$

พิจารณาค่าในแถว $c_j - z_j$ ถ้ามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ทุกตัวแสดงว่าคำตอบตัวแปรที่ได้เป็นคำตอบที่ดีที่สุด แต่ถ้าไม่ใช่ให้เลือกตัวแปรเข้าเป็นตัวแปรเบสิคจากตัวแปรในสดมภ์ที่มีค่า $c_j - z_j$ ค่าลบมากที่สุด

ทำการคำนวณในค่า z_j และ $c_j - z_j$ ดังได้แสดงมา และหาคำตอบที่เหมาะสมต่อไป ดังตารางต่อไปนี้

	c_j	ตัวแปร เบสิค	คำตอบ	-1	-2	0	1	0	0	ขจัด เบสิค
			260	x_1	x_2	s_1	s_2	d_1	d_2	
R_1	0	s_2	140	1	0	0	1	-1	1	140
R_2	0	s_1	80	1	0	1	0	0	0	α
R_3	-2	x_2	60	0	1	0	-1	1	0	-60
		z_j	140	0	-2	0	2	-2	0	
		$c_j - z_j$		-1	0	0	-1	2	0	

↑

ขั้นตอนที่ 3

	c_j	ตัวแปร เบสิค	คำตอบ	-1	-2	0	1	0	0	ขจัด เบสิค
			260	x_1	x_2	s_1	s_2	d_1	d_2	
R_1	1	s_2	140	1	0	0	1	-1	1	
R_2	0	s_1	80	1	0	1	0	0	0	
R_3	-2	x_2	200	1	1	0	0	0	1	
		z_j	0	-1	-2	0	1	-1	-1	
		$c_j - z_j$		0	0	0	0	1	1	

โดยที่ $R_1 = R_1$, $R_2 = R_2$ และ $R_3 = R_3 + R_1$

จะเห็นได้ว่า Z มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 แสดงว่าระบบสามารถหาคำตอบได้ ซึ่งคำตอบที่ดีที่สุดสามารถหาได้จากเฟส 2 ดังนี้

นำสัมประสิทธิ์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในระบบแทนลงในแถว c_j ดังแสดงในตารางต่อไปนี้
ขั้นตอนที่ 4

	c_j	ตัวแปร เบสิค	คำตอบ	3000	8000	0	0	0	0	ขจัด เบสิค
				x_1	x_2	s_1	s_2	d_1	d_2	
R_1	0	s_2	140	1	0	0	1	-1	1	140
R_2	0	s_1	80	1	0	1	0	0	0	80
R_3	8000	x_2	200	1	1	0	0	0	1	200
		z_j	1.6×10^6	8000	8000	0	0	0	8000	
		$c_j - z_j$		-5000	0	0	0	0	0	

↑

ขั้นตอนที่ 5

	c_j	ตัวแปร เบสิค	คำตอบ	3000	8000	0	0	0	0	ขจัด เบสิค
				x_1	x_2	s_1	s_2	d_1	d_2	
R_1	0	s_2	60	0	0	-1	1	-1	1	
R_2	3000	x_1	80	1	0	1	0	0	0	
R_3	8000	x_2	120	0	1	1	0	0	1	
		z_j	1.2×10^6	3000	8000	11000	0	0	8000	
		$c_j - z_j$		0	0	-11000	0	0	-8000	

โดยที่ $R_1 = R_1 - R_2$, $R_2 = R_2$ และ $R_3 = R_3 - R_2$

เมื่อ $c_j - z_j$ ของสมมติตัวแปรในฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ทุกตัว แสดงว่าคำตอบที่ได้คือคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่ง $x_1 = 80$ และ $x_2 = 120$ และ Z ต่ำสุด = 1.2×10^6

เมื่อนำโปรแกรมโหราซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปมาใช้ในการแก้ปัญหาเชิงเส้น จะได้คำตอบเหมือนกับที่คำนวณได้ข้างต้น ดังนี้

จากโจทย์ตัวอย่าง

Title: Example

	x1	x2	RHS
min	3000	8000	
Constraint 1:	1	1	= 200
Constraint 2:	1	0	<= 80
Constraint 3:	0	1	>= 60

เมื่อใช้โปรแกรมโทรหาในการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีการคำนวณสองระยะจะได้คำตอบ
ดังนี้

*** OPTIMUM SOLUTION SUMMARY ***

 Title: Example
 Final iteration No: 5
 Objective value (min) =1200000.0000

Variable	Value	Obj Coeff	Obj Val Contrib
x1	80.0000	3000.0000	240000.0000
x2	120.0000	8000.0000	960000.0000

ภาคผนวก ง
ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น

ง.1 ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับกรณีศึกษาที่ 3

MAP DESIGN PACKAGING REPORT

Fruit and Vegetable Name	Cabbage(mamer lagerweiss)	Produce Weight	0.50	kg
Storage Temperature	273.00 K	RHpackaging	92	%
Surface area packaging	627.00 cm(2)	Total thickness	1.00	mil
[O2]	3.00 %	[CO2]	6.00	%
R(O2)	1.30 ml kg(-1) hr(-1)	R(CO2)	1.30	ml kg(-1) hr(-1)
Water vapour pressure	0.005 atm	Transpiration Rate	20.2120	ml kg(-1) hr(-1)

<u>Permeability</u>	<u>Oxygen</u>	<u>Carbondioxide</u>	<u>Water Vapour</u>	<u>Thickness</u>
Natural rubber	7.81E-02	5.72E-01	-	0.7794
PET(Mylar)	1.19E-04	4.03E-04	-	0.0093
PP(d=0.8931)	2.34E-03	1.12E-03	-	0.2113
No data	-	-	-	-
Required Permeability	: 0.0056	0.0198	16.0000	
Designed Permeability	: 0.0056	0.0198	-	
%Error	: 0.00%	0.00%	-	
Min. Cost	: 0.0427	Baht		

Unit : Permeability [ml mil cm(-2) hr(-1) atm(-1)] , Thickness [mil]

ง.2 ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับกรณีศึกษาที่ 6

ง.2.1 การออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการจัดเก็บพริกไทยสดที่มีความหนาฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นโดยรวมเท่ากับ 1 mil

MAP DESIGN PACKAGING REPORT

Fruit and Vegetable Name	Green Pepper		Produce Weight	0.20	kg
Storage Temperature	281.50	K	RHpackaging	85	%
Surface area packaging	725.00	cm(2)	Total thickness	1.00	mil
[O ₂]	3.00	%	[CO ₂]	3.00	%
R(O ₂)	5.00	ml kg(-1) hr(-1)	R(CO ₂)	5.00	ml kg(-1) hr(-1)
Water vapour pressure	0.009	atm	Transpiration Rate	181.2208	ml kg(-1) hr(-1)

<u>Permeability</u>	<u>Oxygen</u>	<u>Carbondioxide</u>	<u>Water Vapour</u>	<u>Thickness</u>
Natural rubber	1.19E-01	8.03E-01	-	0.1198
PP(d=0.8871)	4.89E-03	1.70E-02	-	0.0713
PP(extruded)	6.87E-03	5.72E-02	-	0.8089
No data	-	-	-	-
Required Permeability	: 0.0075	0.0541	46.3000	
Designed Permeability	: 0.0075	0.0541	-	
%Error	: 0.00%	0.00%	-	
Min. Cost	: 0.0440	Baht		

Unit : Permeability [ml mil cm(-2) hr(-1) atm(-1)] , Thickness [mil]

ง.2.2 การออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการจัดเก็บพริกไทยสดที่มีความหนาฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นโดยรวมเท่ากับ 2 mil

MAP DESIGN PACKAGING REPORT

Fruit and Vegetable Name	Green Pepper		Produce Weight	0.20	kg
Storage Temperature	281.50	K	RHpackaging	85	%
Surface area packaging	725.00	cm(2)	Total thickness	2.00	mil
[O ₂]	3.00	%	[CO ₂]	3.00	%
R(O ₂)	5.00	ml kg(-1) hr(-1)	R(CO ₂)	5.00	ml kg(-1) hr(-1)
Water vapour pressure	0.009	atm	Transpiration Rate	181.2208	ml kg(-1) hr(-1)
<u>Permeability</u>	<u>Oxygen</u>	<u>Carbondioxide</u>	<u>Water Vapour</u>	<u>Thickness</u>	
Natural rubber	1.19E-01	8.03E-01	-	1.1777	
PP(d=0.8871)	4.89E-03	1.70E-02	-	0.0635	
PP(extruded)	6.87E-03	5.72E-02	-	0.7588	
No data	-	-	-	-	
Required Permeability	: 0.0150	0.1083	92.7000		
Designed Permeability	: 0.0150	0.1083	-		
%Error	: 0.00%	0.00%	-		
Min. Cost	: 0.0952	Baht			

Unit : Permeability [ml mil cm(-2) hr(-1) atm(-1)] , Thickness [mil]

ง.2.3 การออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการจัดเก็บพริกไทยสดที่มีความหนาฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นโดยรวมเท่ากับ 3 mil

MAP DESIGN PACKAGING REPORT

Fruit and Vegetable Name	Green Pepper		Produce Weight	0.20	kg
Storage Temperature	281.50	K	RHpackaging	85	%
Surface area packaging	725.00	cm(2)	Total thickness	3.00	mil
[O ₂]	3.00	%	[CO ₂]	3.00	%
R(O ₂)	5.00	ml kg(-1) hr(-1)	R(CO ₂)	5.00	ml kg(-1) hr(-1)
Water vapour pressure	0.009	atm	Transpiration Rate	181.2208	ml kg(-1) hr(-1)
<u>Permeability</u>	<u>Oxygen</u>	<u>Carbondioxide</u>	<u>Water Vapour</u>	<u>Thickness</u>	
Natural rubber	1.19E-01	8.03E-01	-	2.2307	
PP(d=0.8871)	4.89E-03	1.70E-02	-	0.0543	
PP(extruded)	6.87E-03	5.72E-02	-	0.7150	
No data	-	-	-	-	
Required Permeability	:	0.0224	0.1624	139.0000	
Designed Permeability	:	0.0224	0.1624	-	
%Error	:	0.00%	0.00%	-	
Min. Cost	:	0.1464	Baht		

Unit : Permeability [ml mil cm(-2) hr(-1) atm(-1)] . Thickness [mil]

ง.2.4 การออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการจัดเก็บพริกไทยสดที่มีความหนาฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นโดยรวมเท่ากับ 4 mil

MAP DESIGN PACKAGING REPORT

Fruit and Vegetable Name	Green Pepper		Produce Weight	0.20	kg
Storage Temperature	281.50	K	RHpackaging	85	%
Surface area packaging	725.00	cm(2)	Total thickness	4.00	mil
[O ₂]	3.00	%	[CO ₂]	3.00	%
R(O ₂)	5.00	ml kg(-1) hr(-1)	R(CO ₂)	5.00	ml kg(-1) hr(-1)
Water vapour pressure	0.009	atm	Transpiration Rate	181.2208	ml kg(-1) hr(-1)
<u>Permeability</u>	<u>Oxygen</u>	<u>Carbondioxide</u>	<u>Water Vapour</u>	<u>Thickness</u>	
Natural rubber	1.19E-01	8.03E-01	-	3.2902	
PP(d=0.8871)	4.89E-03	1.70E-02	-	0.0476	
PP(extruded)	6.87E-03	5.72E-02	-	0.6622	
No data	-	-	-	-	
Required Permeability	: 0.0299	0.2165	185.0000		
Designed Permeability	: 0.0299	0.2165	-		
%Error	: 0.00%	0.00%	-		
Min. Cost	: 0.1977	Baht			

Unit : Permeability [ml mil cm(-2) hr(-1) atm(-1)] , Thickness [mil]

ง.2.5 การออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการจัดเก็บพริกไทยสดที่มีความหนาฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นโดยรวมเท่ากับ 5 mil

MAP DESIGN PACKAGING REPORT

Fruit and Vegetable Name	Green Pepper		Produce Weight	0.20	kg
Storage Temperature	281.50	K	RHpackaging	85	%
Surface area packaging	725.00	cm(2)	Total thickness	5.00	mil
[O ₂]	3.00	%	[CO ₂]	3.00	%
R(O ₂)	5.00	ml kg(-1) hr(-1)	R(CO ₂)	5.00	ml kg(-1) hr(-1)
Water vapour pressure	0.009	atm	Transpiration Rate	181.2208	ml kg(-1) hr(-1)
<u>Permeability</u>	<u>Oxygen</u>	<u>Carbondioxide</u>	<u>Water Vapour</u>	<u>Thickness</u>	
Natural rubber	1.19E-01	8.03E-01	-	4.3491	
PP(d=0.8871)	4.89E-03	1.70E-02	-	0.0407	
PP(extruded)	6.87E-03	5.72E-02	-	0.6102	
No data	-	-	-	-	
Required Permeability	: 0.0374	0.2706	232.0000		
Designed Permeability	: 0.0374	0.2706	-		
%Error	: 0.00%	0.00%	-		
Min. Cost	: 0.2490	Baht			

Unit : Permeability [ml mil cm(-2) hr(-1) atm(-1)] . Thickness [mil]

ง.3 ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับกรณีศึกษาที่ 7

ง.3.1 การออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการจัดเก็บลิค (Leek)

MAP DESIGN PACKAGING REPORT

Fruit and Vegetable Name	Leek		Produce Weight	0.30	kg
Storage Temperature	274.50	K	RHpackaging	95	%
Surface area packaging	888.00	cm(2)	Total thickness	1.00	mil
[O ₂]	2.20	%	[CO ₂]	4.90	%
K(O ₂)	10.00	ml kg(-1) hr(-1)	R(CO ₂)	9.00	ml kg(-1) hr(-1)
Water vapour pressure	0.006	atm	Transpiration Rate	74.1007	ml kg(-1) hr(-1)
<u>Permeability</u>	<u>Oxygen</u>	<u>Carbondioxide</u>	<u>Water Vapour</u>	<u>Thickness</u>	
Natural rubber	8.43E-02	6.08E-01	-	0.8592	
PP(d=0.8871)	2.96E-03	1.05E-02	-	0.1271	
PP(extruded)	4.07E-03	4.92E-02	-	0.0137	
No data	-	-	-	-	
Required Permeability	:	0.0177	0.0725	18.9000	
Designed Permeability	:	0.0177	0.0725	-	
%Error	:	0.00%	0.00%	-	
Min. Cost	:	0.0609	Baht		

Unit : Permeability [ml mil cm(-2) hr(-1) atm(-1)] . Thickness [mil]

ง.3.2 การออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการจัดเก็บพริกไทยสด

MAP DESIGN PACKAGING REPORT

Fruit and Vegetable Name	Green Pepper		Produce Weight	0.20	kg
Storage Temperature	281.50	K	RHpackaging	85	%
Surface area packaging	725.00	cm ²	Total thickness	1.00	mil
[O ₂]	3.00	%	[CO ₂]	3.00	%
R(O ₂)	5.00	ml kg ⁻¹ hr ⁻¹	R(CO ₂)	5.00	ml kg ⁻¹ hr ⁻¹
Water vapour pressure	0.009	atm	Transpiration Rate	181.2208	ml kg ⁻¹ hr ⁻¹
<u>Permeability</u>	<u>Oxygen</u>	<u>Carbondioxide</u>	<u>Water Vapour</u>	<u>Thickness</u>	
Natural rubber	1.19E-01	8.03E-01	-	0.1198	
PP(d=0.8871)	4.89E-03	1.70E-02	-	0.0713	
PP(extruded)	6.87E-03	5.72E-02	-	0.8089	
No data	-	-	-	-	
Required Permeability	:	0.0075	0.0541	46.3000	
Designed Permeability	:	0.0075	0.0541	-	
%Error	:	0.00%	0.00%	-	
Min. Cost	:	0.0440	Baht		
Unit : Permeability [ml mil cm ⁻² hr ⁻¹ atm ⁻¹] , Thickness [mil]					

3.3.3 ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการจัดเก็บแอปเปิ้ล

MAP DESIGN PACKAGING REPORT

Fruit and Vegetable Name	Apple(golden)		Produce Weight	2.27	kg
Storage Temperature	274.15	K	RHpackaging	-	%
Surface area packaging	1320.00	cm(2)	Total thickness	1.00	mil
[O ₂]	3.00	%	[CO ₂]	3.00	%
R(O ₂)	1.10	ml kg(-1) hr(-1)	R(CO ₂)	1.20	ml kg(-1) hr(-1)
Water vapour pressure	-	atm	Transpiration Rate	-	ml kg(-1) hr(-1)

<u>Permeability</u>	<u>Oxygen</u>	<u>Carbondioxide</u>	<u>Water Vapour</u>	<u>Thickness</u>
Natural rubber	8.28E-02	5.99E-01	-	0.6640
PP(d=0.8871)	2.89E-03	1.03E-02	-	0.0552
PP(extruded)	3.96E-03	4.88E-02	-	0.2808
No data	-	-	-	-
Required Permeability :	0.0102	0.0818	-	
Designed Permeability :	0.0102	0.0818	-	
%Error :	0.00%	0.00%	-	
Min. Cost :	0.0877	Baht		

Unit : Permeability [ml mil cm(-2) hr(-1) atm(-1)] . Thickness [mil]

ง.3.4 การออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการจัดเก็บขึ้นฉ่ายหั่นเป็นชิ้น

MAP DESIGN PACKAGING REPORT

Fruit and Vegetable Name	Celery(clean cut)		Produce Weight	0.70	kg
Storage Temperature	274.50	K	RHpackaging	92	%
Surface area packaging	1210.00	cm ²	Total thickness	1.00	mil
[O ₂]	5.00	%	[CO ₂]	3.00	%
R(O ₂)	2.80	ml kg ⁻¹ hr ⁻¹	R(CO ₂)	1.70	ml kg ⁻¹ hr ⁻¹
Water vapour pressure	0.006	atm	Transpiration Rate	260.8345	ml kg ⁻¹ hr ⁻¹
<u>Permeability</u>	<u>Oxygen</u>	<u>Carbondioxide</u>	<u>Water Vapour</u>	<u>Thickness</u>	
Natural rubber	8.43E-02	6.08E-01	-	0.7117	
PP(d=0.8871)	2.96E-03	1.05E-02	-	0.2585	
PP(extruded)	4.07E-03	4.92E-02	-	0.0299	
No data	-	-	-	-	
Required Permeability	:	0.0097	0.0379	134 0000	
Designed Permeability	:	0.0097	0.0379	-	
%Error	:	0.00%	0.00%	-	
Min. Cost	:	0.0808	Baht		

Unit : Permeability [ml mil cm⁻² hr⁻¹ atm⁻¹] . Thickness [mil]

ง.4 ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับกรณีศึกษาที่ 8

ง.4.1 การออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการจัดเก็บกะหล่ำปลีหั่นละเอียด
ที่อุณหภูมิ 278.15 เคลวิน

MAP DESIGN PACKAGING REPORT

Fruit and Vegetable Name	Shredded cabbage		Produce Weight	0.06	kg
Storage Temperature	278.15	K	RHpackaging	-	%
Surface area packaging	720	cm(2)	Total thickness	0.9843	mil
[O ₂]	3	%	[CO ₂]	5	%
R(O ₂)	12.877	ml kg(-1) hr(-1)	R(CO ₂)	10.752	ml kg(-1) hr(-1)
Water vapour pressure	-	atm	Transpiration Rate	-	ml kg(-1) hr(-1)
<u>Permeability</u>	<u>Oxygen</u>	<u>Carbondioxide</u>	<u>Water Vapour</u>	<u>Thickness</u>	
Natural rubber	1.01E-01	7.04E-01	-	0.3257	
PP(d=0.8871)	3.86E-03	1.36E-02	-	0.6426	
PP(extruded)	5.36E-03	5.33E-02	-	0.0159	
No data	-	-	-	-	
Required Permeability	:	0.0057	0.0205	-	
Designed Permeability	:	0.0057	0.0205	-	
%Error	:	0.00%	0.00%	-	
Min. Cost	:	0.0442	Baht		

Unit : Permeability [ml mil cm(-2) hr(-1) atm(-1)] , Thickness [mil]

ง.4.2 การออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการจัดเก็บกะหล่ำปลีหั่นละเอียด
ที่อุณหภูมิ 283.15 เคลวิน

MAP DESIGN PACKAGING REPORT

Fruit and Vegetable Name	Shredded cabbage		Produce Weight	0.06	kg
Storage Temperature	283.15	K	RHpackaging	-	%
Surface area packaging	720	cm(2)	Total thickness	0.9843	mil
[O ₂]	3	%	[CO ₂]	5	%
R(O ₂)	22.013	ml kg(-1) hr(-1)	R(CO ₂)	18.381	ml kg(-1) hr(-1)
Water vapour pressure	-	atm	Transpiration Rate	-	ml kg(-1) hr(-1)
<u>Permeability</u>	<u>Oxygen</u>	<u>Carbondioxide</u>	<u>Water Vapour</u>	<u>Thickness</u>	
Natural rubber	1.20E-01	8.55E-01	-	0.4467	
PP(d=0.8871)	5.48E-03	1.90E-02	-	0.5159	
PP(extruded)	7.75E-03	5.92E-02	-	0.0217	
No data	-	-	-	-	
Required Permeability	:	0.0098	0.0351	-	
Designed Permeability	:	0.0098	0.0351	-	
%Error	:	0.00%	0.00%	-	
Min. Cost	:	0.0452	Baht		

Unit : Permeability [ml mil cm(-2) hr(-1) atm(-1)] . Thickness [mil]

ง.4.3 การออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการจัดเก็บกะหล่ำปลีหั่นละเอียด
ที่อุณหภูมิ 288.15 เคลวิน

MAP DESIGN PACKAGING REPORT

Fruit and Vegetable Name	Shredded cabbage		Produce Weight	0.06	kg
Storage Temperature	288.15	K	RHpackaging	-	%
Surface area packaging	720	cm(2)	Total thickness	0.9843	mil
[O ₂]	3	%	[CO ₂]	5	%
R(O ₂)	36.0951	ml kg(-1) hr(-1)	R(CO ₂)	30.854	ml kg(-1) hr(-1)
Water vapour pressure	-	atm	Transpiration Rate	-	ml kg(-1) hr(-1)
<u>Permeability</u>	<u>Oxygen</u>	<u>Carbondioxide</u>	<u>Water Vapour</u>	<u>Thickness</u>	
Natural rubber	1.62E-01	1.03E00		0.5183	
PP(d=0.8871)	7.70E-03	2.63E-02	-	0.3997	
PP(extruded)	1.10E-02	6.56E-02	-	0.0663	
No data	-	-	-	-	
Required Permeability	:	0.0161	0.0589	-	
Designed Permeability	:	0.0161	0.0589	-	
%Error	:	0.00%	0.00%	-	
Min. Cost	:	0.0459	Baht		

Unit : Permeability [ml mil cm(-2) hr(-1) atm(-1)] . Thickness [mil]

ง.4.4 การออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการจัดเก็บกะหล่ำปลีหั่นละเอียด
ที่อุณหภูมิ 293.15 เคลวิน

MAP DESIGN PACKAGING REPORT

Fruit and Vegetable Name	Shredded cabbage		Produce Weight	0.06	kg
Storage Temperature	293.15	K	RHpackaging	-	%
Surface area packaging	720	cm(2)	Total thickness	0.9843	mil
[O ₂]	3	%	[CO ₂]	5	%
R(O ₂)	60.8510	ml kg(-1) hr(-1)	R(CO ₂)	50.8106	ml kg(-1) hr(-1)
Water vapour pressure	-	atm	Transpiration Rate	-	ml kg(-1) hr(-1)
<u>Permeability</u>	<u>Oxygen</u>	<u>Carbondioxide</u>	<u>Water Vapour</u>	<u>Thickness</u>	
Natural rubber	2.02E-01	1.24E00	-	0.6131	
PP(d=0.8871)	1.07E-02	3.60E-02	-	0.3232	
PP(extruded)	1.56E-02	7.23E-02	-	0.0480	
No data	-	-	-	-	
Required Permeability	:	0.0271	0.0971	-	
Designed Permeability	:	0.0271	0.0971	-	
%Error	:	0.00%	0.00%	-	
Min. Cost	:	0.0467	Baht		

Unit : Permeability [ml mil cm(-2) hr(-1) atm(-1)] , Thickness [mil]

ง.4.5 การออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการจัดเก็บกะหล่ำปลีหั่นละเอียด
ที่อุณหภูมิ 298.15 เคลวิน

MAP DESIGN PACKAGING REPORT

Fruit and Vegetable Name	Shredded cabbage		Produce Weight	0.06	kg
Storage Temperature	298.15	K	RHpackaging	-	%
Surface area packaging	720	cm(2)	Total thickness	0.9843	mil
[O ₂]	3	%	[CO ₂]	5	%
R(O ₂)	98.59	ml kg(-1) hr(-1)	R(CO ₂)	๘2.323	ml kg(-1) hr(-1)
Water vapour pressure	-	atm	Transpiration Rate	-	ml kg(-1) hr(-1)
<u>Permeability</u>	<u>Oxygen</u>	<u>Carbondioxide</u>	<u>Water Vapour</u>	<u>Thickness</u>	
Natural rubber	2.51E-01	1.48E00	-	0.6584	
PP(d=0.8871)	1.47E-02	4.87E-02	-	0.2179	
PP(extruded)	2.17E-02	7.95E-02	-	0.1079	
No data	-	-	-	-	
Required Permeability	:	0.0439	0.1573	-	
Designed Permeability	:	0.0439	0.1570	-	
%Error	:	0.00%	0.19%	-	
Min. Cost	:	0.0471	Baht		

Unit : Permeability [ml mil cm(-2) hr(-1) atm(-1)] . Thickness [mil]

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวธิดา ตติยไพญ์ เกิดเมื่อวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2521 ที่เขตสาทร กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542