

บทที่ 11

เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

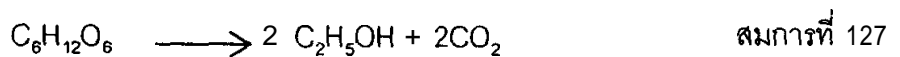
เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม (Engineering Economy) เป็นการพิจารณาและการออกแบบทางวิศวกรรมศาสตร์ โดยการคำนึงถึงต้นทุน วัสดุ ค่าแรงงาน ค่าไฟฟ้า และราคาของผลิตภัณฑ์ที่ได้ นอกจากนั้นยังต้องคำนึงถึงการแข่งขันของอุตสาหกรรมคู่แข่ง ตลอดจนการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพด้วย โดยหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาเพื่อการออกแบบและการเลือกใช้กระบวนการที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมนั้น คือ

1. การคำนึงถึงทุนที่ต้องใช้สำหรับถังหมักและเครื่องมือ โดยเครื่องมือดังกล่าวควรเป็นอุปกรณ์ที่มีความแข็งแรง และสามารถนำมาใช้ในกระบวนการอย่างอื่นได้
2. วัสดุที่ใช้ควรมีราคาถูกที่สุด สามารถหาได้ง่าย มีความสม่ำเสมอของวัสดุ นอกจากนั้นควรเป็นวัสดุที่สะดวกต่อการเตรียม ไม่ก่อให้เกิดปัญหาในการให้อากาศและการกวนในระหว่างการเพาะเลี้ยง กระบวนการเก็บเกี่ยวและการทำให้บริสุทธิ์ นอกจากนี้ยังควรศึกษาและพัฒนาเพื่อหาวัสดุอื่นที่สามารถนำมาใช้เพื่อทดแทน ถ้าเกิดปัญหาของราคาหรือการขาดแคลนของวัสดุเดิม
3. การใช้จุลินทรีย์สายพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสูงสุด ที่สามารถเจริญได้อย่างรวดเร็ว มีความคงตัวทางพันธุกรรมสูง ไม่สร้างสารที่เป็นอันตรายหรือสารที่ก่อให้เกิดโรค นอกจากนี้ควรเลือกสายพันธุ์ที่สามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิสูง ทั้งนี้เพื่อลดค่าใช้จ่ายของการหล่อเย็นในระหว่างการเพาะเลี้ยง
4. การเลือกใช้กระบวนการหมัก หรือชนิดของการหมัก ในกรณีของการเพาะเลี้ยงแบบเบดท์ ควรเลือกและเก็บเกี่ยวผลผลิตในช่วงเวลาที่เหมาะสม เพื่อให้ผลผลิตที่ได้ต่อเวลามีค่าสูงสุด
5. ควรเลือกใช้ขั้นตอนและกระบวนการเก็บเกี่ยว การทำให้บริสุทธิ์ โดยการใช้น้ำที่น้อยที่สุด แต่มีประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวผลผลิตได้มากที่สุด หรือมีการสูญเสียของผลผลิตน้อยที่สุด และเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดด้วย
6. ปริมาณน้ำและพลังงาน ไฟฟ้าที่ใช้ ควรคำนวณและจัดการระบบเพื่อให้เกิดการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ
7. ปริมาณของน้ำเสียหรือปริมาณน้ำทิ้งที่เกิดขึ้น จะต้องมีปริมาณน้อยและสามารถบำบัดได้

ในการคำนึงถึงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ทั้งในเชิงวิศวกรรมและในเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยประสิทธิภาพในเชิงวิศวกรรม จะหมายถึงอัตรา ส่วนของผลที่ได้ต่องานหรือพลังงานที่ใช้ไป

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงวิศวกรรม} = \frac{\text{ผลที่ได้ (output)}}{\text{งานที่ใช้ไป (input)}}$$

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานในการขับเคลื่อนในเชิงวิศวกรรม จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีการสูญเสียหรือการเปลี่ยนแปลงของพลังงานไปในรูปอื่น ทำให้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ไปไม่สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานเพื่อการขับเคลื่อนได้หมด ทำให้ประสิทธิภาพที่ได้มีค่าน้อยกว่า 100% หรือกรณีของการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์โดยกระบวนการหมักในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ถ้าประสิทธิภาพการหมักเป็น 100% แสดงว่าน้ำตาล 1 กรัม สามารถเปลี่ยนเป็นแอลกอฮอล์ได้ 0.511 กรัม ตามกฎของ Gay-Lussac ดังแสดงในสมการที่ 127 แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะพบว่าปริมาณน้ำตาลจะถูกนำไปใช้หรือเปลี่ยนแปลงเป็นสารชนิดอื่น ทำให้ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนเป็นแอลกอฮอล์มีค่าน้อยกว่า 100% โดยทั่วไปประสิทธิภาพของการผลิตแอลกอฮอล์จะมีค่าประมาณ 90-97% ซึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแอลกอฮอล์ในเชิงวิศวกรรม อาจพิจารณาได้จากการพัฒนาชนิดของถังหมัก ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์และอาหารเลี้ยงเชื้อ สภาวะที่เหมาะสมในการผลิต เพื่อให้ประสิทธิภาพในการผลิตเพิ่มขึ้นหรือมีค่าใกล้เคียง 100%



ส่วนความหมายของประสิทธิภาพในเชิงเศรษฐศาสตร์นั้น เป็นการเปรียบเทียบของจำนวนเงินที่เป็นผลได้ต่อจำนวนเงินที่เป็นค่าใช้จ่าย โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์ มักมีค่าที่มากกว่า 100%

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์} = \frac{\text{จำนวนเงินผลได้ (income)}}{\text{จำนวนเงินค่าใช้จ่าย (spent)}}$$

ในกรณีการผลิตแอลกอฮอล์ ถ้ากำหนดให้ต้นทุนของน้ำตาลที่ใช้ กิโลกรัมละ 15 บาท ส่วนราคาแอลกอฮอล์กิโลกรัมละ 60 บาท ถ้าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเป็นแอลกอฮอล์ในเชิงวิศวกรรมมีค่าเท่ากับ 95% แล้ว ประสิทธิภาพในเชิงเศรษฐศาสตร์ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์} &= \frac{0.511 \times 60 \times 0.95 \times 100}{15} \\ &= 194\% \end{aligned}$$

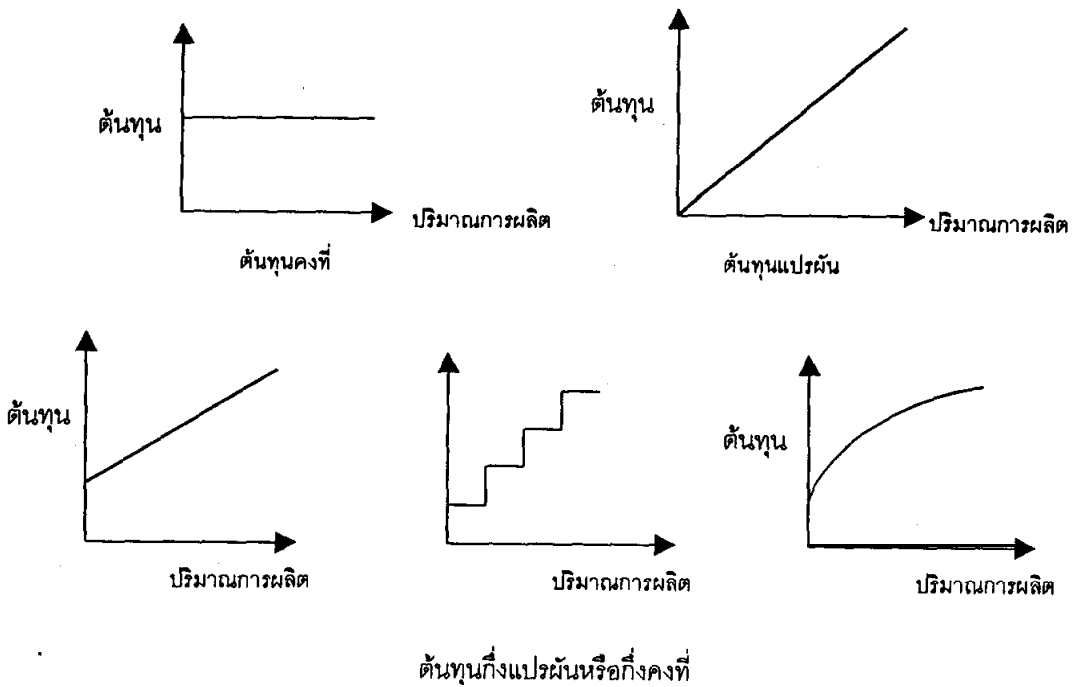
การพิจารณาพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อการลงทุน

1. ต้นทุน (Cost) รูปแบบและลักษณะของต้นทุนมีได้ดังนี้

ต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผัน (Fixed and Variable Cost)

ต้นทุนคงที่ หมายถึงค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวกับการก่อสร้าง ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆรวมทั้งค่าติดตั้ง ค่าใช้จ่ายในการบริหาร การรักษาความปลอดภัย ค่าประกันภัย การควบคุมคุณภาพ ค่าใช้จ่ายในการค้นคว้าวิจัยและพัฒนา ค่าบำรุงรักษาอาคารและเครื่องมือต่างๆ ต้นทุนคงที่นี้จะมีค่าที่คงที่ไม่ขึ้นกับปริมาณการผลิต ส่วนต้นทุนแปรผันหมายถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดจากวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการ ค่าเชื้อเพลิง ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าจ้างเจ้าหน้าที่ต่างๆ ซึ่งต้นทุนดังกล่าวจะแปรผันตามปริมาณการผลิต

ต้นทุนกึ่งแปรผัน (semi-variable cost) เป็นต้นทุนผันแปรที่มีอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ เช่น การทำงานของพนักงานที่เกินเวลาทำงานปกติ เช่น เกิน 40 ชั่วโมง จำเป็นต้องมีการจ้างล่วงเวลา ค่าจ้างล่วงเวลานี้ จะเป็นค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นในส่วนของต้นทุนแรงงาน ส่วนต้นทุนกึ่งคงที่ (semi-fixed cost) เป็นต้นทุนคงที่ที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการผลิต



ต้นทุนโดยตรงและต้นทุนทางอ้อม (Direct and Indirect Cost)

ต้นทุนโดยตรงเป็นต้นทุนที่สามารถกำหนดได้ชัดเจนว่าเป็นต้นทุนของผลิตภัณฑ์ ต้นทุนของการดำเนินงาน หรือเป็นค่าใช้จ่ายในการบริการใดๆ ส่วนต้นทุนทางอ้อม เป็นต้นทุนร่วมที่ไม่สามารถแจกแจงเป็นแต่ละรายการของค่าใช้จ่ายได้

ต้นทุนแรกเริ่มและต้นทุนดำเนินการ (First and Operating Cost)

ต้นทุนแรกเริ่ม เป็นค่าใช้จ่ายในการลงทุน การจัดซื้อ ที่ดิน อาคารสถานที่ อาคาร โรงงาน เครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อการผลิต ซึ่งบางที่จะเรียกว่าต้นทุนทุนทรัพย์ (Capital Cost) ส่วนต้นทุนดำเนินการหรือเรียกได้ว่าเป็น Working Capital เป็นค่าใช้จ่ายเพื่อให้สามารถเกิดผลผลิตหรือบริการได้ และสามารถได้รับคืนได้ในระยะเวลาอันสั้น โดยการหมุนเวียนของเงินรายได้และรายจ่ายหลังจากสินค้าออกสู่ตลาดแล้ว

ตารางที่ 44 แสดงต้นทุนในส่วนต่างๆของกระบวนการผลิต

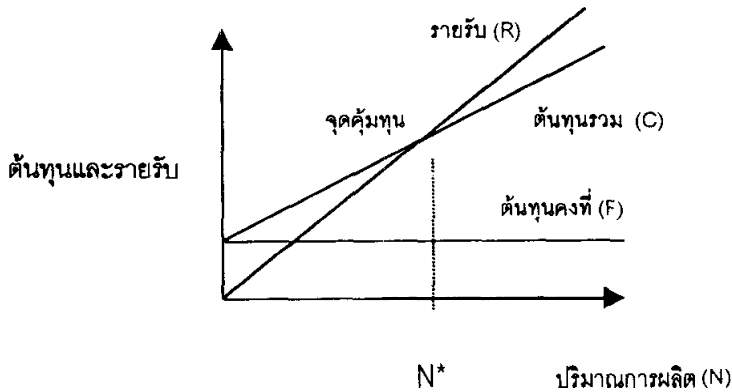
รายการ	% ของต้นทุนคงที่
Fixed Capital	
<u>A. Direct Costs</u>	
(i) Land - property, surveys, recording, fees, commissions, taxes, etc.	2-3%
(ii) Site development - utility hook-ups, site clearing, grading, excavating, roads, walkways, landscaping, railway	4-6%
(iii) Buildings - foundations, <i>offices</i> , shops, warehouses, processing and utility areas, labs, locker rooms, cafeteria. services to buildings (plumbing, HVAC, painting, etc.)	10-15%
(iv) Processing - equipment, installation, piping, <i>electrical</i> . instrumentation. special foundations, insulation, paint, insurance, taxes	40-70%
(v) Services - as above, plus distribution systems. Non-processing equipment also included, e.g., lab and office equipment	20-30%
<u>B. Indirect Costs</u>	
(i) Engineering - design, PI & D, procurement, administration, cost control. etc.	5-15%
(ii) Construction - field supervision, temporary facilities. tools, equipment	5-15%
(iii) Contingency depends on the level of detail of the estimate	3-50%
(iv) Fees engineering, construction, contractors	4-6%
<u>C. Start-up Costs</u>	5-20%
Equipment and construction modifications, personnel training, technical support, operating expenses	
Working Capital	15%
<u>A. Inventory</u>	
Raw materials, and supplies in warehouse, raw materials and supplies in finished product, finished product	
<u>B. Accounts receivable,</u>	
Shipped finished product waiting payment	
<u>C. Accounts payable</u>	
Salaries and wages due, raw material and supply payments due, utilities, etc.	

ตารางที่ 45 แสดงโมเดลพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณเงินลงทุนที่ต้องใช้

Capital equipment costs	
Detailed list of all major equipment pieces	A (bare module costs)
Ancillary equipment (pumps, boilers, air compressors, cooling towers etc.)	B (bare module costs)
Subtotal	(A + B)
Contingency and fees	40% of (A + B)
Total Equipment	1.4 (A + B)
Buildings (1.5% of total equipment)	0.15 x {1.4(A + B)}
Land and site development (7% of total equipment)	0.07 x (1.4(A + B))
Startup costs (10% of total equipment)	0.10 x {1.4(A + B)}
Fixed Capital Costs	C (sum of above elements)
Working capital	
(3 months raw materials and supplies, 1 month labor)	W
Total Capital Investment	c + w

2. ค่าเสื่อมราคา (Depreciation) สามารถจำแนกได้ดังนี้
 - 2.1 การเสื่อมราคาทางกายภาพ (Physical Depreciation) เป็นการเสื่อมราคา เนื่องจากการสึกหรอชำรุด หรือแตกหัก เนื่องจากการใช้งาน
 - 2.2 การเสื่อมราคาทางลักษณะการใช้งาน (Functional Depreciation) เป็นการเสื่อมราคา อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะของความต้องการ เช่น เครื่องมือ หรือกระบวนการเดิมที่ไม่สามารถผลิตให้ได้เพียงพอกับความต้องการ
 - 2.3 การเสื่อมราคาจากอุบัติเหตุ (Accidents) เช่น ไฟไหม้ น้ำท่วม เป็นต้น ทำให้ทรัพย์สินหรือเครื่องมือที่ใช้หมดสภาพการใช้งาน

3. จุดคุ้มทุนหรือจุดเท่าทุน (break-even point, BEP) คือ จุดที่รายได้จากการลงทุนคุ้มกับค่าลงทุน หรือกล่าวได้ว่ารายจ่ายกับรายรับเท่ากัน หรือเป็นจุดที่มีกำไรเป็นศูนย์ โดยการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนนี้ เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นทุน (cost) รายรับ (revenue) และผลกำไร (profit) ซึ่งผันแปรตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการผลิต หรือเรียกได้ว่าเป็นการวิเคราะห์ ต้นทุน ปริมาณการผลิต ผลกำไร (Cost-Volume-Profit Analysis)



รูปที่ 92 แสดงจุดคุ้มทุน

จากรูปที่ 92 แสดงจุดคุ้มทุนในตำแหน่งที่เป็นจุดตัดของรายรับกับต้นทุน ซึ่งสามารถแสดงได้ที่ N^*

โดยที่
$$C = F + (N \cdot V)$$

- เมื่อ F เป็นต้นทุนคงที่
- V เป็นต้นทุนแปรผัน
- C เป็นต้นทุนหรือค่าใช้จ่าย
- N เป็นปริมาณที่ผลิตได้
- R เป็นรายรับ
- P เป็นผลกำไร
- p เป็นราคาต่อหน่วยการผลิต

$$P = R - C$$

$$R = N \cdot p$$

$$\text{ที่จุดคุ้มทุน } R = C$$

$$N \cdot p = F + (N \cdot V)$$

$$N^* = \frac{F}{P - V}$$

ปริมาณ N^* จะเป็นค่าที่แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ ปริมาณการขาย ที่จุดคุ้มทุน โดยค่า $p - V$ เป็นค่าที่แสดงผลที่ได้ต่อหน่วย (Marginal Contribution) ซึ่งเป็นผลต่างของราคาผลิตภัณฑ์และต้นทุนแปรผันต่อหน่วย โดยปริมาณการผลิตที่มากกว่าค่า N^* หรือ $R > C$ แสดงถึงกำไรที่ได้ ในขณะที่ปริมาณการผลิตที่น้อยกว่า N^* หรือ $R < C$ จะแสดงการขาดทุน

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน ทำให้สามารถกำหนดเงื่อนไขในการควบคุมค่าใช้จ่าย ปริมาณการผลิตหรือราคาที่เหมาะสมเพื่อให้ได้กำไรตามเป้าหมาย ซึ่งมีผลต่อการลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นด้วย

ตัวอย่างที่ 53 ในการผลิตยาเพนนิซิลิน เพื่อขายในราคาเม็ดละ 10 บาท เมื่อต้นทุนคงที่เป็น 20,000 บาท ต้นทุนแปรผันเป็น 20,000 บาทต่อการผลิต 4,000 เม็ด จงคำนวณกำไรที่ได้

วิธีทำ ราคาต้นทุนต่อเม็ดเป็น $\frac{20,000}{4,000} = 5$ บาทต่อเม็ด

ดังนั้นในการผลิต 4,000 เม็ด จะคุ้มทุน เนื่องจากมีรายรับเท่ากับ 40,000 บาท โดยมีต้นทุนคงที่ 20,000 บาท และต้นทุนแปรผันเป็น 20,000 บาท

ถ้าการผลิตยิ่งน้อย จะทำให้การขาดทุนเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถ้าไม่มีการผลิตเลย จะขาดทุนเท่ากับ 20,000 บาท ซึ่งเป็นส่วนของต้นทุนคงที่ แต่ถ้าสามารถผลิตและขายได้ 8,000 เม็ด จะได้เงินจากการขายเป็น $8,000 \times 10 = 80,000$ บาท

โดยมีเงินทุนเป็น $20,000 + (8,000 \times 5) = 20,000 + 40,000$

$$= 60,000 \text{ บาท}$$

$$\text{กำไร} = \text{รายได้} - \text{ต้นทุน}$$

$$= 80,000 - 60,000$$

$$= 20,000 \text{ บาท}$$

ถ้าอัตราการผลิตดังกล่าวคิดเป็นต่อเดือน จะทำให้การผลิตยาเพนนิซิลิน 8,000 เม็ด มีกำไรเป็น 20,000 บาทต่อเดือน

ตัวอย่างที่ 54 จากข้อมูลค่าใช้จ่ายที่ให้ไว้ จงวิเคราะห์จุดคุ้มทุน
ค่าใช้จ่ายต้นทุนแปรผัน เมื่อการผลิตเต็มตามสมรรถภาพ

โดยมี ค่าแรงโดยตรง เป็น	10,000 บาท
ค่าวัสดุโดยตรง	22,000 บาท
ค่าใช้จ่ายโรงงาน	18,000 บาท
ค่าใช้จ่ายในการบริหารและการขาย	10,000 บาท

ค่าใช้จ่ายต้นทุนคงที่

โดยมี ค่าดอกเบี้ย	5,000 บาท
ค่าเสื่อมราคา	17,000 บาท
รายได้จากการขาย	100,000 บาท
เงินปันผลเดือนละ	10,000 บาท

วิธีทำ

$$C = F + (N * V)$$

$$F = 22,000 \text{ บาท}$$

$$N * V = 60,000 \text{ บาท}$$

$$R = N p$$

$$= 100,000 \text{ บาท}$$

ถ้าสมรรถภาพการผลิต เป็น 100,000 หน่วย

$$P = 1 \text{ บาท}$$

$$V = 0.60$$

ปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุน

$$N^* = F$$

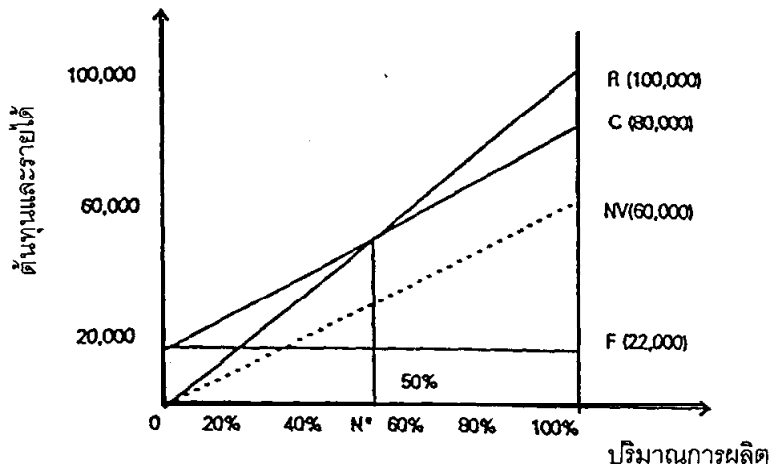
$$p - V = 1 - 0.60$$

$$= 22,000$$

$$0.4$$

$$= 55,000$$

หรือ 55% ของสมรรถภาพการผลิต



ตัวอย่างที่ 55 ถ้ากำหนดให้ข้อมูลของโรงงานผลิตกานามัยซิน มีดังนี้

$$F = 90,000 \text{ บาทต่อเดือน}$$

$$N = 12,000 \text{ หน่วยต่อเดือน}$$

$$V = 16 \text{ บาทต่อหน่วย}$$

$$p = 20 \text{ บาทต่อเดือน}$$

วิธีทำ

$$P = N'p - F - (N^*V)$$

$$= 12,000 (20) - 90,000 - (12,000 (16))$$

$$= -42,000 \text{ บาท}$$

$$\text{และ } N^* = \frac{90,000}{20 - 16}$$

$$= 22,500 \text{ หน่วย}$$

ถ้าต้องการให้โรงงานสามารถดำเนินการต่อไป แนวทางในการนำมาพิจารณา

คือ

1. การเพิ่มยอดขายจาก 12,000 หน่วย ให้เพิ่มขึ้นมากกว่า 22,500 หน่วย
2. การลดต้นทุนคงที่ (F) จาก 90,000 ให้เป็น 48,000 บาท
3. การลดต้นทุนแปรผันจากหน่วยละ 16 บาท เป็น 12.50 บาท
4. การเพิ่มราคาจาก 20 บาท เป็น 23.50 บาท

I. DIRECT OPERATING COSTS

- A. Raw materials and supplies
 - 1. Raw materials (30-80% of manufacturing cost)
 - a. Primary
 - b. Secondary
 - c. Freight
 - 2. Supplies
 - a. Operating (3-5% of direct labor and supervision)
 - b. Maintenance (100% of maintenance labor and supervision; 2-5% of fixed capital investment)
 - c. Laboratory (20-40% of laboratory labor)
 - d. Other (10-20% of plant overhead)
 - 3. By-product credits/debits
- B. Labor and Supervision (10-40% of manufacturing cost)
 - 1. Base salaries and wages from manpower estimate
 - 2. Overtime (6% of base hourly wages)
 - 3. Fringe benefits (30-40% of salaries and wages)
- C. Utilities (5-20% of manufacturing cost)
 - 1. Steam
 - 2. Electricity
 - 3. Water
 - 4. Waste treatment

II. FIXED COSTS

- A. Depreciation and interest (8-12% of fixed capital for depreciation, 10-15% for interest)
- B. Taxes (1-4% of fixed capital)
- C. Insurance (1-3% of fixed capital)
- D. Rent (variable)

III. PLANT OVERHEAD

10-70% of labor and supervision, depending on level of detail of manpower estimate

Iv. ADMINISTRATION

V. MARKETING

VI. RESEARCH and DEVELOPMENT

MANUFACTURING COST = I + II + III

GENERAL EXPENSES = IV + V + VI

TOTAL PRODUCT COST = MANUFACTURING COST +
GENERAL EXPENSES

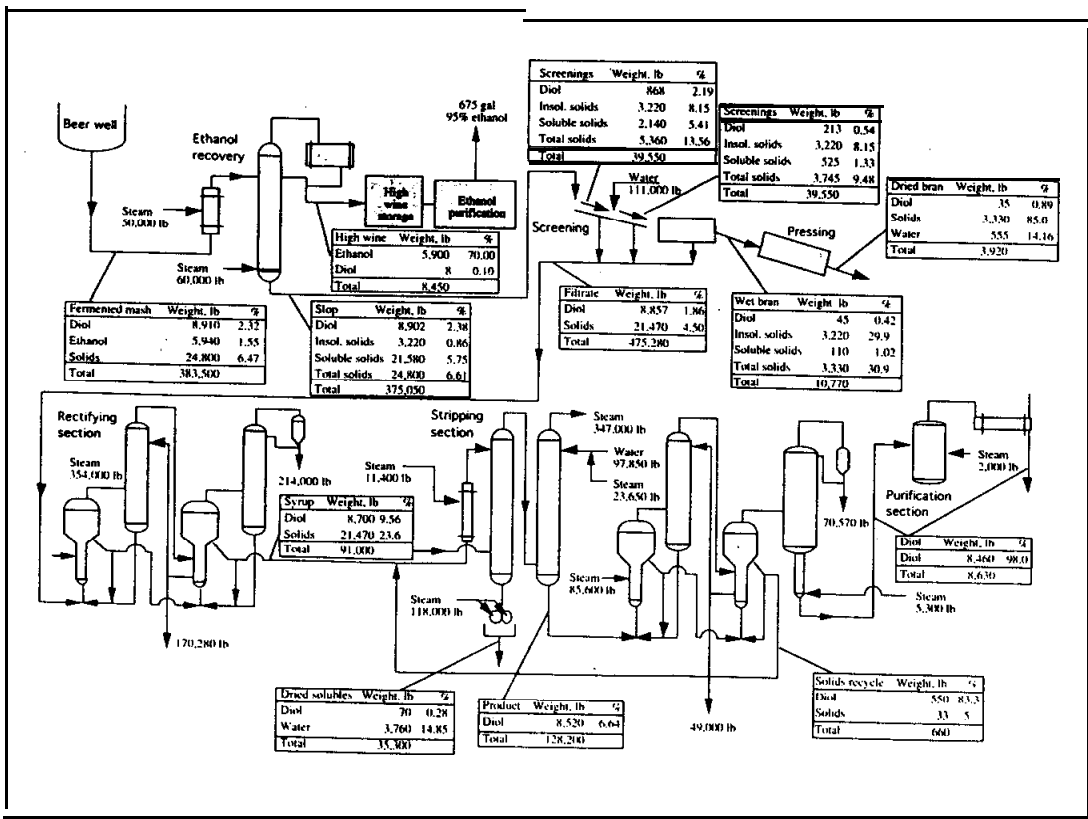
การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการ

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการ เพื่อให้ทราบผลที่เกิดขึ้นจากการดำเนินการตามโครงการนั้น โดยการวิเคราะห์ทางด้านการตลาด วิศวกรรม และการเงินของโครงการเป็นหลัก ทั้งนี้เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจของผู้ลงทุนในโครงการนั้น

ในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการด้านการตลาดและวิศวกรรมนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงการสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต โดยเฉพาะในปีแรกของการผลิต การสูญเสียของวัตถุดิบเริ่มต้น หรือในระหว่างกระบวนการผลิต การสูญเสียผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษาและการขนส่ง หรือการสูญเสียเนื่องจากการบริการรับและประกันสินค้า

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการภายใต้ความเสี่ยง และความไม่แน่นอนที่เกิด เนื่องจากความซับซ้อนของปัญหา เทคโนโลยีที่ก้าวหน้า การเพิ่มขึ้นของประชากร ตลอดจนรูปแบบของการแข่งขัน ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากในการตัดสินใจ ดังนั้นข้อมูลที่มีความละเอียดและถูกต้อง จะมีความสำคัญและชี้แนวทางในการวิเคราะห์และการตัดสินใจ

การพัฒนากระบวนการทางชีวภาพ มักคำนึงถึงชนิดของผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยแผนผัง โดย Upstream เป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับการรับ การเก็บและการเตรียมวัตถุดิบ การเตรียมเชื้อ ส่วน Downstream เป็นส่วนของการเตรียมผลิตภัณฑ์ การบรรจุ และการขนส่ง ซึ่งแต่ละส่วนต้องการปริมาณ และคุณภาพของน้ำ ปริมาณไฟฟ้า ตลอดจนสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน ในการพิจารณาค่าใช้จ่ายต่างๆในแต่ละกระบวนการนั้น สามารถแสดงได้ทั้งเส้นทางการเข้าออกของน้ำ ก๊าซ หรือของแข็งที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการ ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องทราบ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณสมดุลของมวลสารและพลังงานที่เกิดขึ้นหรือเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละกระบวนการ



รูปที่ 93 แสดงสมดุขของมวลสารต่างๆในแต่ละขั้นตอนของการเก็บเกี่ยว 2,3-butanediol

เมื่อพิจารณากระบวนการผลิตกรดซिटริก จากข้อมูลเบื้องต้น พบว่า

เวลาที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง เป็น 120 ชั่วโมง

ปริมาณกลูโคสที่ใช้ เป็น 150 กรัมต่อลิตร

ผลได้ของกรดซิทริก เป็น 0.80 กรัมของกรดซิทริกต่อกรัมของกลูโคส

อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

พีเอช 5-7

อัตราการให้อากาศ 1.5 ปริมาตรต่อปริมาตรต่อนาที

เมื่อกำหนดสมดุลของสารและพลังงาน โดยพิจารณาให้การผลิตกรดซิดริกเป็น

10 ล้านปอนด์ต่อปี และเวลาที่ใช้ในการทำงานเป็น 8,000 ชั่วโมงต่อปี

$$\begin{aligned}\text{ปริมาณน้ำหมักต่อปี} &= (10 \times 10^6 \text{ lb/yr}) \times (454 \text{ gm/lb}) / (0.8 \text{ gm/gm} \times 150 \text{ gm/l}) \\ &= 37,833,333 \text{ ลิตรต่อปี}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{จำนวนครั้งของการเพาะเลี้ยง} &= (8,000 \text{ hrs/yr}) / (120 \text{ hrs/batch}) \\ &= 66.7 \text{ ครั้งต่อปี}\end{aligned}$$

$$\text{ปริมาตรของน้ำหมักทั้งหมด} = 567,472 \text{ ลิตร}$$

$$\text{จำนวนถังหมัก} = 5 \text{ ถัง}$$

$$\text{ปริมาตรของการหมักในแต่ละถัง} = 113,494 \text{ ลิตร}$$

$$\begin{aligned}\text{อัตราการไหลของน้ำหมัก เพื่อการเก็บเกี่ยว} &= 37,833,333 / 8,000 \text{ ลิตรต่อชั่วโมง} \\ &= 113,494 \text{ ลิตรต่อวัน}\end{aligned}$$

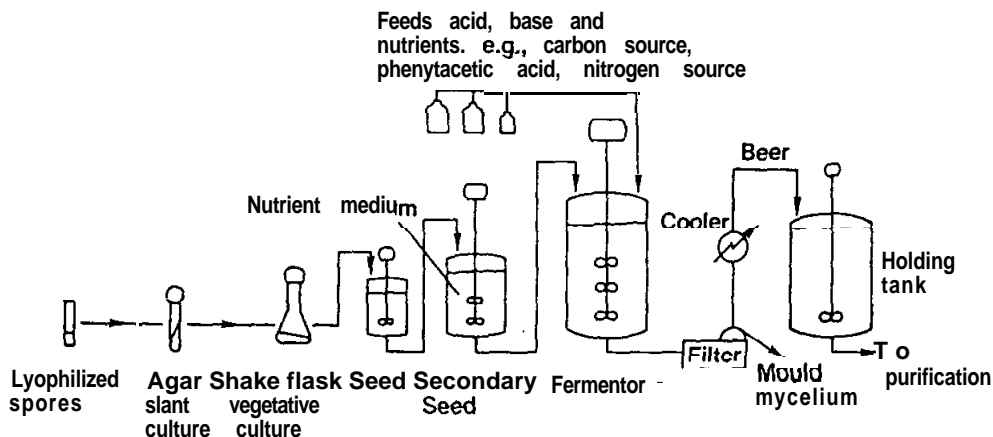
$$\begin{aligned}\text{ปริมาณไอน้ำที่ใช้ในระบบไร้เชื้อ} &= (121 - 20^\circ\text{C}) \times (113,494 \text{ kg/day}) \times (1.0 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}) / \\ &\quad (544 \text{ kcal/kg})\end{aligned}$$

$$\text{เวลาที่ใช้ในระบบไร้เชื้อ} = 3 \text{ ชั่วโมง}$$

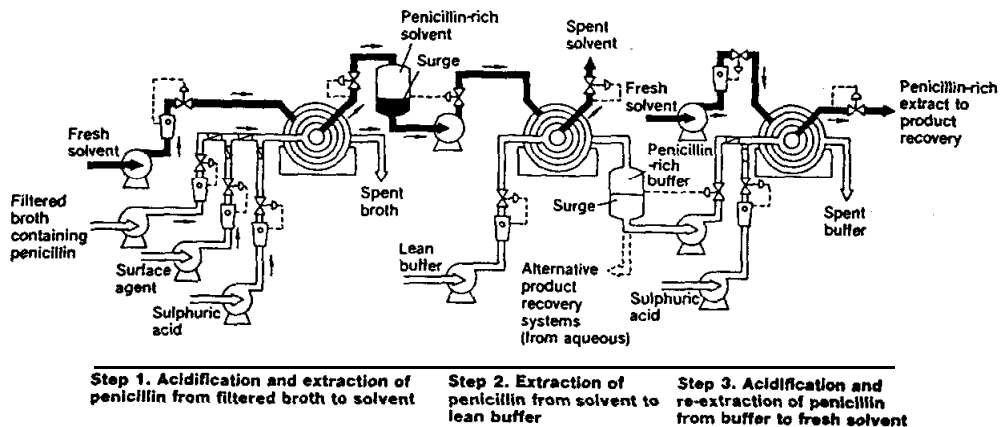
$$\text{ปริมาณไอน้ำที่ต้องการ} = 7.024 \text{ กิโลกรัมต่อชั่วโมง}$$

$$\begin{aligned}\text{อัตราการให้อากาศ} &= (1.5 \text{ vvm}) \times (113,494 \text{ lit}) / (1,000 \text{ lit/m}^3) \\ &= 170 \text{ m}^3 / \text{min}\end{aligned}$$

เมื่อพิจารณาอุตสาหกรรมการผลิตเพนนิซิลิน ซึ่งแสดงกระบวนการผลิตในช่วงการเตรียมเชื้อจนถึงกระบวนการหมัก ดังแสดงในรูปที่ 94 และกระบวนการเก็บเกี่ยวและการทำให้บริสุทธิ์ ดังแสดงในรูปที่ 95



รูปที่ 94 แสดงกระบวนการผลิตเพนนิซิลิน ในช่วงการเตรียมเชื้อจนถึงกระบวนการหมัก



รูปที่ 95 แสดงกระบวนการเก็บเกี่ยวและการทำให้บริสุทธิ์ของเพนนิซิลิน

เมื่อคำนวณผลได้ของเพนนิซิลินจากสูตรของอาหารเลี้ยงเชื้อ พบว่าการผลิตเพนนิซิลินจากกลูโคสนั้น มีดังนี้

$Y_{P/S} = 1.13$ กรัมต่อกรัม เมื่อพิจารณาผลผลิตในรูปของเกลือโปตัสเซียมของเพนนิซิลิน จี ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 372.5

$Y_{X/S} = 0.45$ กรัมของเซลล์ต่อกรัมของกลูโคส

สัมประสิทธิ์การคงสภาพ (maintenance coefficient, m) = 0.027 กรัมของกลูโคสต่อกรัมของเซลล์ต่อชั่วโมง

ถ้ากำหนดให้เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักแล้ว มี

ปริมาณเซลล์เป็น 35 กรัมต่อลิตร

ปริมาณเพนนิซิลินที่ได้จากการเก็บเกี่ยว เท่ากับ 30 กรัมต่อลิตร

โดยกระบวนการเพาะเลี้ยงที่เกิดขึ้นจะใช้ระยะเวลา 25 ชั่วโมง เพื่อให้เชื้อ *Penicillium* เจริญ และที่เวลา 180 ชั่วโมง เพื่อให้เชื้อสร้างผลผลิต ถ้าปริมาณกลูโคสทั้งหมดที่ถูกใช้ไปนั้น สามารถแสดงได้ในรูปของกรัมของกลูโคสที่ถูกใช้ไปต่อปริมาตรของน้ำหมักสุดท้าย ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณกลูโคสที่ใช้เพื่อการสร้างเซลล์} &= 35 \text{ (gm/l)} \times (1/0.45) \\ &= 77.8 \text{ gm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณกลูโคสเพื่อการสร้างพลังงาน} &= 0.027 \text{ (gm/gm/hr)} \times (35 \text{ gm/l)} \times 180 \text{ hr} \\ &= 170 \text{ gm} \end{aligned}$$

$$\text{ปริมาณกลูโคสที่ใช้ไปทั้งหมด} = 273.3 \text{ gm}$$

$$\text{ประสิทธิภาพของผลผลิตที่ได้} = 30/274.3$$

$$\text{(gm pen G per gm glucose)} = 0.109 \text{ gm/gm}$$

จากค่าต่างๆที่คำนวณได้นี้ สามารถนำกลับไปคำนวณราคาของสูตรอาหารได้ โดยพิจารณาจากสมมูลของมวลสาร ซึ่งค่าใช้จ่ายในส่วนของอาหารเลี้ยงเชื้อนี้ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 47 ซึ่งเป็นราคาที่ประมาณไว้ในปี ค.ศ 1979

ตารางที่ 47 แสดงชนิด ปริมาณ และราคาของอาหารที่ใช้เพื่อการผลิตเพนนิซิลิน

วัตถุดิบ	ปริมาณ (กรัม/ลิตร)	ราคา (\$/กิโลกรัม)	ราคา (\$/ ลิตร)
glucose	274.3	0.22	0.0603
corn steep liquor	44	0.11	0.0048
(NH ₄) ₂ SO ₄	10.7	0.25	0.0027
Na phenylacetate (80% incorporated)	15.9	2.95	0.0469
KH ₂ PO ₄	2.74	0.985	0.0027
other			0.0119
<i>Total</i>			<i>0.1294 (Miter)</i> <i>496.76 (\$/1000 gallon)</i>

ในกระบวนการหมัก ถ้ากระบวนการผลิตเพนนิซิลินเกิดขึ้นในถังหมักที่มีขนาด 50,000 แกลลอน ทั้งหมด 5 ถังหมัก โดยถังหมักแต่ละถังมีปริมาตรจุได้ 40,000-45,000 แกลลอน ตัวถังทำด้วยสแตนเลสที่มีขนาด 304 ในการกวนต้องใช้พลังงานเท่ากับ 700 แรงม้า ดังนั้นการกวนในแต่ละถังหมัก จะใช้พลังงานเท่ากับ 1.5 แรงม้าต่อ 100 แกลลอน ส่วนการให้อากาศนั้นพบว่าต้องใช้คอมเพรสเซอร์ 3 ตัว แต่ละตัว สามารถป้อนอากาศได้ 10,500 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที และปริมาณอากาศจะถูกควบคุมให้ผ่านลงไปในถังหมักในปริมาณ 0.82 ปริมาตรต่อปริมาตรต่อ นาที นอกจากตัวถังที่ใช้ในกระบวนการหมักแล้ว พบว่ายังมีตัวถังที่ใช้ในการเตรียมหัวเชื้อ 3 ถัง ถังที่หนึ่งสำหรับการเตรียมสารตั้งต้นในที่นี้ คือ ฟีนิลอะซิติกแอซิก และถังที่ใช้เตรียมกรดและต่าง เพื่อการควบคุมความเป็นกรดต่าง โดยระยะเวลาที่ใช้ในการหมักเพนนิซิลิน 1 รอบ จะใช้เวลา 205 ชั่วโมง ซึ่งประกอบด้วยระยะเวลาที่ใช้ในการเจริญเป็น 25 ชั่วโมง ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตเพนนิซิลิน เท่ากับ 180 ชั่วโมง และอีก 10 ชั่วโมง เป็นเวลาที่เสียไป (turn around) เพื่อการล้าง และการเตรียมอุปกรณ์ ถ้าระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเดินเครื่องเพื่อการผลิตเพนนิซิลิน เทียบเท่ากับ 8,000 ชั่วโมงต่อปี โดยทุกปี จะสามารถผลิตน้ำหมักได้ 10.23×10^6 แกลลอน

เมื่อพิจารณากระบวนการเก็บเกี่ยว โดยทั่วไปพบว่า การเก็บเกี่ยวเพนนิซิลิน จะต้องเสียค่าใช้จ่ายประมาณร้อยละ 85 โดยกระบวนการที่ต้องใช้ในการเก็บเกี่ยวและการทำให้บริสุทธิ์ ประกอบด้วย เครื่องกรองแบบสายพาน (belt filtration) เครื่องสกัด (Extraction) เครื่องตกผลึก (Crystallization) และเครื่องอบแห้งภายใต้สุญญากาศ (Vacuum drying) ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนได้ดังแสดงในรูปที่ 95

ส่วนค่าสาธารณูปโภคและค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่ในส่วนนี้มาจากพลังงานที่ใช้ในหม้อต้มไอน้ำ เพื่อนำไอน้ำไปใช้ในระบบการไร้เชื้อ (sterilisation) และการใช้ไฟฟ้าในการควบคุมตลอดจนค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำทิ้งหรือของเสียที่เกิดขึ้น ส่วนค่าใช้จ่ายอื่น ๆ นั้นสามารถแสดงได้ในตารางที่ 48

ตารางที่ 48 แสดงค่าใช้จ่ายในการผลิตเพนนิซิลินโดยตรง ซึ่งคำนวณจากการหมัก 1,000 แกลลอน

	ราคา (\$)/ 1,000 แกลลอน		
	การหมัก	การเก็บเกี่ยว	ทั้งหมด
Raw materials	196.76	32.99	529.75
Operating labor at \$10/hr	27.45	52.45	79.90
Direct supervision at \$15/hr	15.00	15.00	30.00
Maintenance	116.26	35.91	152.17
Laboratory	1.27	2.02	3.29
Utilities			
Steam at \$3 /1,000 lb	17.75	28.83	46.58
Electricity at 3.75 cents/Kw- hr	127.77	18.18	145.95
Water at \$0.47/1,000 gallon	2.43	0.92	3.35
Waste treatment at \$250,000/yr	11.00	11.00	22.00
Supplies	9.66	9.66	19.32
<i>Total</i>	825.35	206.96	\$1,032.31

ตารางที่ 49 แสดงค่าใช้จ่ายของโรงงานในการผลิตเพนนิซิลิน ซึ่งคำนวณจากการหมัก 1,000 แกลลอน

	ราคา (\$)/ 1,000 แกลลอน		
	การหมัก	การเก็บเกี่ยว	ทั้งหมด
Direct production costs	825.35	206.96	1,032.31
Fixed charges	351.80	90.16	378.00
Plant overhead	103.89	46.00	131.00
Total	1,281.04	333.12	\$1,541.31