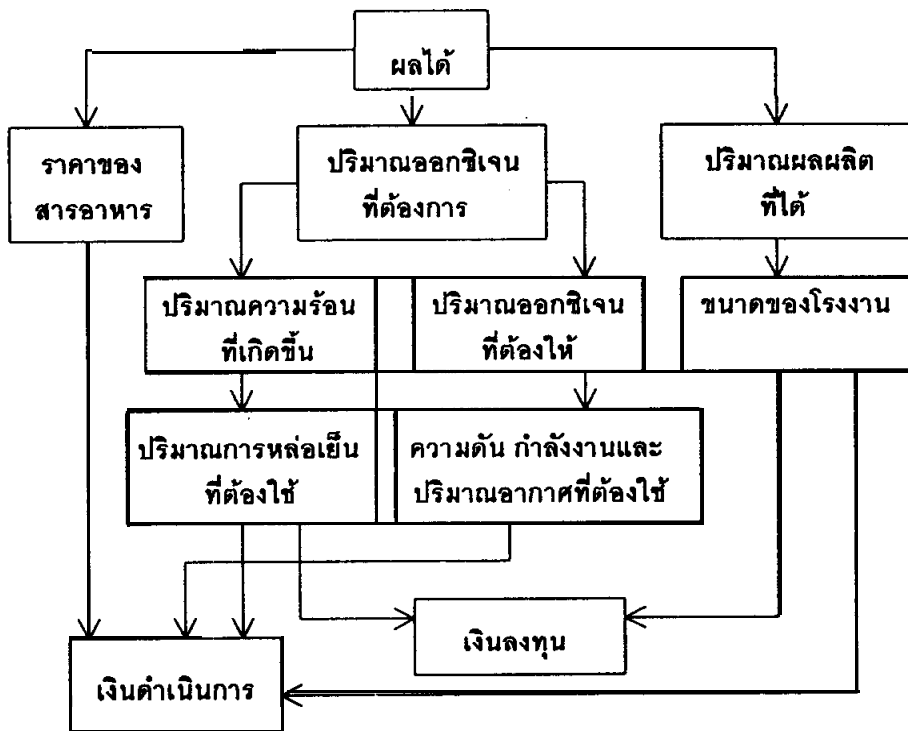


# บทที่ 3

## ผลได้จากกระบวนการทางชีวภาพ

โดยทั่วไปสารอาหารที่มีในอาหารเลี้ยงเชื้อ จะถูกนำไปใช้ในส่วนต่างๆภายในเซลล์ทั้งการนำไปใช้เพื่อการเจริญ การสร้างผลิตภัณฑ์ การสร้างพลังงานและการซ่อมแซมเซลล์ โดยการเปลี่ยนแปลงของสารอาหารต่างๆเหล่านี้พิจารณาได้จากการทำสมดุลของสาร เพื่อคำนวณปริมาณเซลล์ที่ได้ หรือผลได้ของการเจริญ ผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น หรือผลได้ของพลังงาน เป็นต้น ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้จะเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญในการพิจารณาในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากเกี่ยวข้องกับต้นทุน ผลผลิตที่ได้ตลอดจนค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น



## ผลได้ของการเจริญ (growth yield)

ผลได้ของการเจริญ เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญในกระบวนการทางชีวภาพที่ใช้เพื่อการเปรียบเทียบ และการคาดคะเนปริมาณเซลล์ ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ ปริมาณสับสเตรต ปริมาณออกซิเจนที่ต้องใช้ เมื่อเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์ในแหล่งอาหารหรือสภาวะในการเพาะเลี้ยงที่แตกต่างกัน เป็นต้น

## ผลได้ของการเจริญจากสับสเตรต ( $Y_{X/S}$ )

ผลได้ของการเจริญจากสับสเตรต ( $Y_{X/S}$ ) คือ ปริมาณเซลล์จุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta X$ ) ต่อปริมาณสับสเตรตที่ถูกใช้ไป ( $\Delta S$ ) ในช่วงเวลาหนึ่ง โดยที่  $Y_{X/S} = \Delta X / \Delta S$  แสดงได้ดังตารางที่ 7 จากตารางที่ 7 พบว่าการใช้ชนิดของสับสเตรตที่ต่างกันต่อผลได้ของการเจริญจากสับสเตรตและปริมาณเซลล์ที่ได้ ส่วนตารางที่ 8 แสดงสภาวะในการเพาะเลี้ยง เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรดต่อผลได้ของการเจริญจากสับสเตรต

ตารางที่ 7 แสดงชนิดของสับสเตรตต่อ  $Y_{X/S}$   $Y_{kcal}$  และ  $Y_{av e^-}$

ชนิดของจุลินทรีย์	สับสเตรต	$Y_{X/S}$ ( $g\ mol^{-1}$ )	$av e^-$ per mole	$Y_{kcal}$ ( $g\ kcal^{-1}$ )	$Y_{av e^-}$ ( $g\ (av e^-)^{-1}$ )
<i>Arthrobacter globiformis</i>	Glucose	94.0	24		3.92
<i>Azotobacter chroococcum</i>	Mannitol	63.5	26		2.44
<i>Bacillus subtilis</i>	Glucose	81.3	24		3.39
<i>Bacterium HR</i>	Glucose	72.0	24	0.11	3.00
<i>Bacterium TEG-5</i>	Diethylene glycol	58.0	20	0.09	2.90
	Tetraethylene glycol	129.9	40	0.10	3.25
	Triethylene glycol	103.1	30	0.10	3.40
<i>Candida utilis</i>	Acetate	21.6	8	0.10	2.70
	Ethanol	31.6	12	0.09	2.63
	Glucose	90.1	24		3.78
	Glucose	91.9	24	0.13	3.83
	Glucose	92.7	24		3.86
<i>Enterobacter (Acrobacter) aerogenes</i>	L-Arabinose	65.3	20	0.13	3.27
	Citrate	19.6	18		1.09
	Citrate	61.8	18		3.43
	Dihydroxyacetone	31.9	12		2.66
	Fructose	16.1	24	0.14	3.17
	Galactonate	66.3	22	0.14	3.01
	Galactose	73.5	24		3.06
	Galacturonate	55.6	20	0.14	2.78
	Gluconate	62.2	22	0.14	2.83
	Glucose	72.7	24	0.14	3.03

ตารางที่ 7 แสดงชนิดของสับสเตรตต่อ  $Y_{X/S}$   $Y_{kcal}$  และ  $Y_{av e^-}$  (ต่อ)

ชนิดของจุลินทรีย์	สับสเตรต	$Y_s$ (g mol <sup>-1</sup> )	av e <sup>-</sup> per mole	$Y_{kcal}$ (g kcal <sup>-1</sup> )	$Y_{av e^-}$ (g (av e <sup>-</sup> ) <sup>-1</sup> )	
<i>Escherichia coli</i>	Glucose	67.8	24		2.83	
	Glucose	90.0	24		3.75	
	Glucose	94.0	24		3.92	
<i>Hydrogenomonas eutropa</i>	Acetate	20.4	8		2.55	
	Lactate	27.8	12		2.32	
<i>Neurospora crassa</i>	Sucrose	<b>115.0</b>	<b>48</b>		2.40	
<i>Pseudomonas C<sub>12</sub>B</i>	Acetate	23.5	<b>8</b>	0.10	2.94	
	Benzoate	<b>86.8</b>	<b>30</b>	0.11	<b>2.89</b>	
	Phenylacetate	111.0	<b>36</b>	0.11	<b>3.08</b>	
	Phenylglyoxylate	<b>102.2</b>	32	0.11	<b>3.0</b>	
	Succinate	42.3	14	0.11	3.02	
	Succinate + acetate	72.2	<b>22</b>	0.11	3.28	
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Acetate	16.8	8	<b>0.08</b>		
	Acetate	17.0	a		2.1s	
	Citrate	57.5	18		3.19	
	Dodecanol	217.0	72	0.11	3.01	
	Ethanol	22.1	12	<b>0.08</b>		
	Fumarate	<b>38.0</b>	12		3.17	
	Gluconate	62.0	22		2.82	
	Gluconate (30°C)	75.5	<b>22</b>	<b>0.12</b>	3.43	
	Gluconate (37°C)	73.1	22	0.12	3.32	
	Glucose	48.0	24		2.00	
	Glucose	69.5	24	0.11	2.90	
	Glucose	10.4	24		2.93	
	Glucose (30°C)	<b>78.1</b>	24	<b>0.12</b>	3.25	
	Glucose (37°C)	76.2	24	0.11	3.18	
	α-Ketoglurate	52.0	16		<b>3.25</b>	
	α-Ketoglutarate (30°C)	64.6	20	0.12	3.23	
	α-Ketoglutarate (37°C)	62.0	<b>20</b>	0.12	3.10	
	Malate	<b>38.5</b>	<b>12</b>		3.21	
	Malate	<b>44.1</b>	<b>12</b>		3.68	
	Pyruvate	<b>30.0</b>	10		3.00	
	Succinate	41.6	<b>14</b>		2.91	
	<i>Ps. fluorescens</i>	Glucose	119.1	24		<b>4.96</b>
		Lactate	<b>28.8</b>	12	<b>0.11</b>	2.40
		Malate	<b>34.8</b>	12	0.11	<b>2.90</b>
	<i>Rhizobium meliloti</i>	Sucrose	<b>144.0</b>	4s		<b>3.00</b>
	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> <sup>b</sup>	Glucose	71.3	24		2.97
		Glucose	78.4	24		3.27
<i>Salmonella typhimurium</i>	Citrate	21.6	<b>18</b>		1.20	
<i>Serratia marcescens</i>	Glucose + citrate	6.9	<b>1.50+0.71</b>		3.12	
	Glucose + citrate	12.6	2.70+1.12		3.1M	
	Glucose + citrate	21.4	<b>5.19+1.62</b>		3.14	
	Glucose + citrate	<b>29.0</b>	<b>1.56+1.93</b>		<b>3.06</b>	
<i>Streptococcus faecalis</i> <sup>c</sup>	Glucose	<b>38.2</b>	24	<b>0.11</b>		
	Mannitol	<b>64.6</b>	26	0.10		
Mean		65.1	21.51	0.12	3.07	
Average value						

ตารางที่ 8 แสดงความเป็นกรดและอุณหภูมิในการเพาะเลี้ยง *S. cerevisiae* ต่อ  
ผลได้ของการเจริญจากสับสเตรต

ความเป็นกรด	อุณหภูมิ (°C)	$Y_{X/S}$
2.5	29.0	0.58
3.1	22.6	0.58
	35.0	0.57
4.5	20.0	
	29.0	
	38.0	
5.9	22.6	0.55
	35.5	0.55
6.5	29.0	0.55

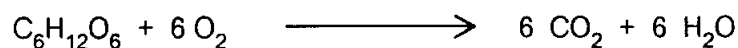
เมื่อพิจารณาผลได้ของการเจริญ โดยการคำนึงถึงปริมาณอิเล็กตรอนที่ได้จาก  
สับสเตรตเริ่มต้น หรือ  $Y_{ave} = Y_{X/S} / Y_{ave-S}$

เมื่อ  $Y_{ave-S}$  เป็นปริมาณอิเล็กตรอนหรือจำนวนอิเล็กตรอนที่ได้จากสับสเตรต 1 โมล

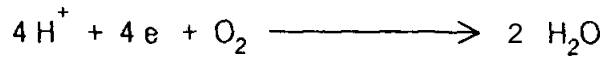
ตัวอย่างที่ 18 ถ้า *P. chrysogenum* มีการเพิ่มปริมาณเซลล์ โดยการสลายกลูโคสได้กาซ  
คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ โดยมีค่า  $Y_{X/S}$  เท่ากับ 0.43 กรัมต่อเซลล์ต่อกรัมของกลูโคสที่ใช้ไป  
จงคำนวณ  $Y_{ave}$

วิธีทำ

จากกระบวนการสลายน้ำตาลพบว่า



ในกระบวนการถ่ายเทอิเล็กตรอน โดยมีภาซออกซิเจนทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนในกระบวนการออกซิเดทีฟฟอสฟอริเลชัน (oxidative phosphorylation) พบว่า



ดังนั้น  $Y_{\text{av e}^-} = \frac{Y_{\text{X/S}} (\text{g/mol glucose})}{Y_{\text{av e}^-/\text{S}} (\text{av e}^-/\text{mol glucose})}$  สมการที่ 18

เมื่อ  $Y_{\text{av e}^-/\text{S}}$  เป็นปริมาณอิเล็กตรอนหรือจำนวนอิเล็กตรอนที่ได้จากสับสเตรต 1 โมล

ดังนั้น  $Y_{\text{av e}^-/\text{S}} = 24$  อิเล็กตรอนต่อกลูโคส 1 โมล

$$Y_{\text{av e}^-} = \frac{0.43 \times 180}{24} = 3.22 \text{ g (av e}^-)^{-1}$$

ผลได้ของเซลล์ต่อการใช้ออกซิเจน ( $Y_{\text{X/O}}$ )

ผลได้ของการสร้างเซลล์ต่อการใช้ออกซิเจน แสดงถึงปริมาณเซลล์ที่เพิ่มขึ้นต่อปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการออกซิเดทีฟฟอสฟอริเลชัน โดยที่

$$Y_{\text{X/O}} = \Delta X / \Delta \text{O}_2$$

เมื่อ  $Y_{\text{X/O}}$  เป็นผลได้ของเซลล์จากออกซิเจน (กรัมของเซลล์ต่อโมลของออกซิเจน)

ตารางที่ 9 แสดงค่า  $Y_{X/S}$ ,  $Y_{ave}$  และ  $Y_{X/O}$  ของจุลินทรีย์แต่ละชนิดในอาหารเลี้ยงเชื้อขั้นต่ำ  
ในสภาวะที่มีออกซิเจน

ชนิดจุลินทรีย์	สับสเตรต	$Y_{X/S}$			$Y_{X/O}$	$Y_{ave}$
		g/g	g/mole	g/g-C	g/g	g/ave
<i>Aerobacter aemgenes</i>	maltose	0.46	149.2	1.03	1.50	3.11
	mannitol	0.52	95.5	1.32	1.18	3.67
	fructose	0.42	76.1	1.05	1.46	3.17
	glucose	0.40	72.7	1.01	1.11	3.00
<i>Candida utilis</i>	glucose	0.51	91.8	1.28	1.32	3.82
<i>Penicillium chrysogenum</i>	glucose	0.43	77.4	1.08	1.35	3.22
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	glucose	0.38	68.4	0.95	0.85	2.85
<i>Rhodopseudomonas spheroides</i>	glucose	0.45	81.0	1.12	1.46	3.37
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	glucose	0.50	90.0	1.25	0.97	3.75
<i>Aerobacter aerogenes</i>	ribose	0.35	53.2	0.88	0.98	2.66
	succinate	0.25	29.7	0.62	0.62	2.12
	glycerol	0.45	41.8	1.16	0.97	2.99
	lactate	0.18	16.6	0.46	0.37	1.38
	pyruvate	0.20	17.9	0.49	0.48	1.78
	acetate	0.18	10.5	0.43	0.31	1.31
<i>Candida utilis</i>	acetate	0.38	21.0	0.90	0.70	2.62
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	acetate	0.28	16.8	0.70	0.46	2.10
<i>Candida utilis</i>	ethanol	0.68	31.2	1.30	0.61	2.60
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	ethanol	0.49	22.5	0.93	0.42	1.87
<i>Klebsiella sp.</i>	methanol	0.38	12.2	1.01	0.56	2.03
<i>Methylomonas sp.</i>	methanol	0.48	13.2	1.28	0.53	2.56
<i>Pseudomonas sp.</i>	methanol	0.41	13.1	1.09	0.44	2.18
<i>Methylococcus sp.</i>	methane	1.01	16.2	1.34	0.29	2.02
<i>Pseudomonas sp.</i>	methane	0.80	12.8	1.08	0.20	1.60
<i>Pseudomonas methanica</i>	methane	0.56	9.0	0.75	0.17	1.12

ผลได้ของเซลล์ต่อปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเมแทบอลิซึม ( $Y_{X/C}$ )

ผลได้ของการสร้างเซลล์ต่อปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเมแทบอลิซึม แสดงถึงปริมาณเซลล์ที่เพิ่มขึ้นต่อปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเมแทบอลิซึม ซึ่งเกี่ยวกับพลังงานที่ใช้เผาผลาญสับสเตรตและพลังงานที่ใช้ในการเผาผลาญผลิตภัณฑ์

โดยที่  $Y_{X/C} = \Delta X / \Delta H_C$

เมื่อ  $H_C$  คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเมแทบอลิซึม

โดยที่  $\Delta H_C = \Delta H_S (\Delta S) - \sum \Delta H_p \Delta P$

เมื่อ  $\Delta H_S$  เป็นพลังงานที่ใช้ในการเผาผลาญสับสเตรต (kcal/mole)

$\Delta H_p$  เป็นพลังงานที่ใช้ในการเผาผลาญผลิตภัณฑ์ (kcal/mole)

$\Delta P$  เป็นความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ (mole/lit)

$\Delta S$  เป็นความเข้มข้นของสับสเตรต (mole/lit)

ดังนั้น  $Y_{X/C} = \frac{\Delta X}{\Delta H_C}$   
 $= \frac{\Delta X}{\Delta H_S (\Delta S) - \sum \Delta H_p \Delta P}$

เมื่อหารด้วย  $\Delta S$  ตลอด จะได้

$$Y_{X/C} = \frac{Y_{X/S}}{\Delta H_S - \sum \Delta H_p Y_{P/S}}$$

สมการที่ 19

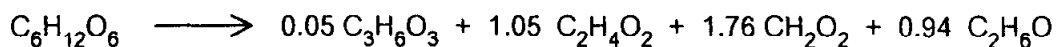
เมื่อ  $Y_{P/S}$  เป็นผลได้ของผลิตภัณฑ์จากสับสเตรต

ตารางที่ 10 แสดงพลังงานที่ใช้ในการเผาผลาญสารอาหารประเภทต่างๆ

สับสเตรต	ความร้อนของการเผาผลาญ (kcal/mole)	ความร้อนของการเผาผลาญที่ได้จากการคำนวณ (kcal/mole)
methane	212.8	208.4 (26.05 x 8)
methanol	173.7	169.3 (26.05 x 6 + 13)
ethanol	326.5	325.8 (28.05 x 12 + 13)
glycerol	397.8	403.7 (26.05 x 14 + 13 x 3)
formaldehyde	134.1	123.7 (26.05 x 4 + 19.5)
acetaldehyde	278.8	280.0 (26.05 x 10 + 19.5)
acetone	436.3	437.3 (26.05 x 16 + 19.5)
formic acid	62.9	52.1 (26.05 x 2)
acetic acid	208.6	208.4 (26.05 x 8)
lactic acid	326.0	325.8 (26.05 x 12 + 13)
pyruvic acid	280.0	280 (26.05 x 10 + 19.5)
tartaric acid	275.1	286.5 (26.05 x 10 + 13 x 2)
maleic acid	320.1	325.6 (26.05 x 12 + 13)
succinic acid	357.1	364.7 (26.05 x 14)
fumaric acid	320.0	312.0 (26.05 x 12)
xylose	561.5	563.0 (26.05 x 20)
galactose	670.7	690.2 (26.05 x 24 + 13 x 5)
glucose	673.0	690.2 (26.05 x 24 + 13 x 5)
rhamnose	718.3	729.0 (26.05 x 26 + 13 x 4)
maltose	1350.2	1354.4 (26.05 x 48 + 13 x 8)

ตัวอย่างที่ 19 ถ้าให้ *Saccharomyces agalactiae* สลายกลูโคส แล้วได้กรดแลคติก กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก และเอทานอล จงหาผลได้ของเซลล์ต่อปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเมแทบอลิซึม ( $Y_{X/C}$ ) เมื่อกำหนดให้  $Y_{X/S}$  เป็น 62.0 กรัมต่อโมลของกลูโคส

วิธีทำ





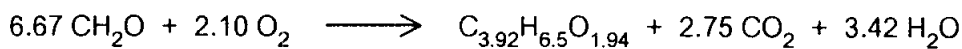
ดังนั้น

$$\begin{aligned}\sum \Delta H_p Y_{P/S} &= (326 \times 0.05) + (208.6 \times 1.05) + (62.9 \times 1.76) + (332.5 \times 0.94) \\ &= 652.9\end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } Y_{X/C} = \frac{Y_{X/S}}{\Delta H_S \cdot \sum \Delta H_p Y_{P/S}}$$

$$\begin{aligned}Y_{WC} &= \frac{62.0}{673.0 - 652.9} \\ &= 3.1 \text{ g/kcal}\end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 20 เซลล์ยีสต์ที่เพาะเลี้ยงในอาหารที่มีแต่กลูโคสเป็นแหล่งของสารอาหาร สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้



จงคำนวณปริมาณความร้อนของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เมื่อปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเผาผลาญเซลล์แห้ง เป็น  $1.517 \times 10^3$  กิโลจูลต่อ 100 กรัมของเซลล์ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเผาผลาญกลูโคส เป็น  $2.817 \times 10^3$  กิโลจูลต่อโมล และ  $Y_{X/S}$  เท่ากับ 0.5 กรัมต่อโมลของสับสเตรต

$$\begin{aligned}\text{วิธีทำ จากเซลล์ยีสต์ 1 โมล พบว่าปริมาณกลูโคสที่ต้องการ} &= 6.67 \times 30 \\ &= 200 \text{ กรัม} \\ &= 1.11 \text{ โมล}\end{aligned}$$

$$\text{จาก } Y_{X/S} = 0.5 \text{ กรัมต่อโมลของสับสเตรต}$$

ดังนั้นปริมาณเซลล์ยีสต์ จะเป็น  $200 \times 0.5 = 100$  กรัม

เมื่อพิจารณาที่ปริมาณเซลล์ทั้งหมด 100 กรัม

จะได้

$$\begin{aligned} \Delta H_{,,} &= (2.817 \times 10^3 \times 1.11) - 1.517 \times 10^3 \\ &= \frac{1.609 \times 10^3 \text{ kJ}}{200 \text{ g glucose}} \\ &= 8.045 \text{ kJ/g} \end{aligned}$$

ผลได้ของเซลล์เมื่อพิจารณาจากพลังงานที่เกิดขึ้นทั้งหมด ( $Y_{\text{kcal}}$ )

กรณีที่เชื้อจุลินทรีย์เจริญในสารอาหารที่สมบูรณ์ ซึ่งประกอบด้วยแหล่งคาร์บอน แหล่งไนโตรเจน และแร่ธาตุที่พอเพียงกับการเจริญ ถ้าเป็นการเพาะเลี้ยงในสภาวะที่มีออกซิเจน เชื้อจุลินทรีย์จะมีการใช้ออกซิเจนผ่านวัฏจักรเครบส์ และระบบลูกโซ่ของการหายใจได้ผลิตภัณฑ์ น้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น แต่ถ้าเป็นการเพาะเลี้ยงในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นอาจเป็นเอทานอล กรดแลกติก กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก เป็นต้น

$$\text{ดังนั้น } Y_{\text{kcal}} = \frac{\Delta X}{\Delta H_a \Delta X + \Delta H_s (\Delta S) - \sum \Delta H_p \Delta P}$$

เมื่อหารด้วย  $\Delta S$  ตลอด จะได้

$$= \frac{Y_{X/S}}{\Delta H_a Y_{X/S} + \Delta H_s - \sum \Delta H_p Y_{P/S}} \quad \text{สมการที่ 20}$$

ถ้าไม่มีการสร้างผลิตภัณฑ์ หรือ  $P = 0$

$$\text{จะได้ } \Delta H_c = \Delta H_s \Delta S$$

จากสมการที่ 20 จะได้

$$Y_{\text{kcal}} = \frac{1}{\Delta H_{,,} + \Delta H_c} Y_{X/S}$$

เมื่อ  $\Delta H_a$  เป็นปริมาณความร้อนที่ใช้เผาผลาญเซลล์

ในกรณีการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเลี้ยงเชื้อขุ่นดำ ซึ่งมีแหล่งคาร์บอนเป็นสารอินทรีย์ แหล่งไนโตรเจนเป็นสารอนินทรีย์ และแร่ธาตุอื่นๆ สารต่างๆดังกล่าวนี้จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสลายและการสร้างส่วนประกอบต่างๆของเซลล์ หรือการสร้างพลังงานที่แตกต่างจากการเลี้ยงเชื้อในสารอาหารที่สมบูรณ์

$$\text{เมื่อ} \quad \Delta S_C = \Delta S - (\alpha_2 / \alpha_1) \Delta X$$

$$\text{และ} \quad \Delta H_C = \frac{\Delta H_S (-\Delta S) (1 - \alpha_2)}{\alpha_1} Y_{X/S} - \sum \Delta H_P \Delta P$$

$$\text{ดังนั้น} \quad Y_{\text{kcal}} = \frac{Y_{X/C}}{\Delta H_a Y_{X/S} + (\Delta H_S (1 - \alpha_2) Y_{X/S}) - \sum \Delta H_P Y_{P/S}} \alpha_1$$

เมื่อ  $\Delta S_C$  คือ ปริมาณคาร์บอนที่นำไปใช้เพื่อการสร้างพลังงาน

$\alpha_1$  คือ ปริมาณคาร์บอนที่มีในสับสเตรต

$\alpha_2$  คือ ปริมาณคาร์บอนที่มีในเซลล์

ตารางที่ 11 แสดงค่า  $Y_{\text{kcal}}$  ของเชื้อจุลินทรีย์และสับสเตรตต่างๆ

เชื้อ	สับสเตรต	$Y_{\text{kcal}}$ (g/kcal)
<i>Aerobacter aerogenes</i>	maltose	0.104
	glucose	0.101
<i>Candida utilis</i>	glucose	0.126
<i>Penicillium chrysogenum</i>	glucose	0.107
<i>Rhodopseudomonas spheroides</i>	glucose	0.112
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	glucose	0.096
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	glucose	0.123
	average	0.116

ตารางที่ 11 แสดงค่า  $Y_{kcal}$  ของเชื้อจุลินทรีย์และสับสเตรตต่างๆ (ต่อ)

เชื้อ	สับสเตรต	$Y_{kcal}$ (g/kcal)
<i>Aetvbacter aerogenes</i>	glycerol	0.108
	ribose	0.089
	succinate	0.073
	glycerol	0.108
	lactate	0.050
	pyruvate	0.059
	average	0.085
<i>Aerobacter aerogenes</i>	acetate	0.048
<i>Candida utilis</i>	acetate	0.092
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	acetate	0.075
	average	0.077
<i>Candida utilis</i>	ethanol	0.112
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	ethanol	0.077
	average	0.090
	<i>Methylomonas methanolica</i>	methanol
<i>Klebsiella</i> sp.	methanol	0.081
<i>Pseudomonas</i> sp.	methanol	0.088
	average	0.088
<i>Pseudomonas</i> sp.	methane	0.077
<i>Methylococcus</i> sp.	methane	0.104
<i>Pseudomonas</i> sp.	methane	0.054
<i>Pseudomonas methanica</i>	methane	0.050
	average	0.066

ตัวอย่างที่ 21 การเลี้ยงเชื้อ *Lactobacillus casei* ในสารอาหารที่สมบูรณ์ที่ประกอบด้วย เปปโตน และสารสกัดจากเนื้อนั้น ได้ค่า  $Y_{XS}$  เป็น 40.5 และ 62 กรัมเซลล์ต่อโมลแมนนิทอลและ กลูโคส เป็นแหล่งคาร์บอนตามลำดับ

ในการเพาะเลี้ยงเชื้อ *L. casei* เมื่อใช้แมนนิทอล 1 โมล เป็นแหล่งคาร์บอน จะ  
ได้

ปริมาณแลคเตต	0.4	โมล
อะซิเตต	0.22	โมล
เอทานอล	1.29	โมล
ฟอร์มเมท	1.6	โมล

ในกรณีที่ใช้กลูโคส 1 โมลเป็นแหล่งคาร์บอน จะได้

แลคเตต	0.05	โมล
อะซิเตต	1.05	โมล
เอทานอล	0.94	โมล
ฟอร์มเมท	1.76	โมล

เมื่อกำหนดให้  $\Delta H_c = 22.175$  กิโลจูลต่อกรัมของเซลล์

และ  $Y_{ave} = 110.876$

$\Delta H_{Glu} = 2661.024$  กิโลจูลต่อโมลของกลูโคส

$\Delta H_{Man} = 2882.776$  กิโลจูลต่อโมลของแมนนิทอล

$\Delta H_{Lac} = 1330.512$  กิโลจูลต่อโมลของแลคโตส

$\Delta H_{Acetate} = 887.008$  กิโลจูลต่อโมลของอะซิเตต

$\Delta H_{Eth} = 1330.512$  กิโลจูลต่อโมลของเอทานอล

$\Delta H_{Formate} = 221.752$  กิโลจูลต่อโมลของฟอร์มเมท

วิธีทำ กรณีที่ใช้แมนนิทอลเป็นแหล่งคาร์บอน

$$\begin{aligned} \sum \Delta H_p Y_{p/S} &= (1330.512 \times 0.4) + (887.008 \times 0.22) + (1330.512 \times 1.29) + (221.752 \times 1.6) \\ &= 2798.51 \text{ kJ/ mol mannitol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } Y_{\text{kcal}} &= \frac{Y_{X/S}}{\Delta H_a Y_{X/S} + \Delta H_s \cdot \sum \Delta H_p Y_{P/S}} \\ &= \frac{40.5}{(22.175 \times 40.5) + 2882.776 \cdot 2798.51} \\ &= 0.0412 \text{ g cell/kJ} \end{aligned}$$

กรณีที่ใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน

$$\begin{aligned} \sum \Delta H_p Y_{P/S} &= (1330.512 \times 0.05) + (887.008 \times 1.05) + (1330.512 \times 0.94) + \\ &\quad (221.752 \times 1.76) \\ &= 2638.849 \text{ kJ/ mol glucose} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } Y_{\text{kcal}} &= \frac{Y_{W/S}}{\Delta H_a Y_{X/S} + \Delta H_s \cdot \sum \Delta H_p Y_{P/S}} \\ Y_{\text{kcal}} &= \frac{62}{(22.175 \times 62) + (266.024) \cdot 2638.849} \\ &= 0.044 \text{ g cell/kJ} \end{aligned}$$

**ตัวอย่างที่ 22** เมื่อกำหนดให้องค์ประกอบของยีสต์เป็น  $C_{3.92}H_{6.5}O_{1.94}$  จงคำนวณปริมาณความร้อนที่ต้องใช้เพื่อการสร้างส่วนต่างๆของเซลล์ยีสต์ 100 กรัม เมื่อกำหนดให้พลังงานที่ต้องใช้เพื่อการเผาผลาญในองค์ประกอบแต่ละส่วนเป็นดังนี้

คาร์บอน	394.133	กิโลจูลต่อโมล
กาซไฮโดรเจน	285.767	กิโลจูลต่อโมล
เซลล์	1,518.792	กิโลจูลต่อโมล

วิธีทำ น้ำหนักโมเลกุลของยีสต์  $C_{3.92}H_{6.5}O_{1.94}$  เท่ากับ 84.58 กรัม

จำนวนโมลของแต่ละองค์ประกอบที่มีในเซลล์ 100 กรัม

$$\begin{aligned}C &= (3.92 \times 100) / 84.58 \\ &= 4.63 \text{ โมล}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}H_2 &= \frac{(6.5 \times 100) / 84.58}{2} \\ &= 3.84 \text{ โมล}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}O_2 &= (1.94 \times 100) / \frac{84.58}{2} \\ &= 1.15 \text{ โมล}\end{aligned}$$

จาก  $4.62 \text{ C} + 3.84 \text{ H}_2 + 1.15 \text{ O}_2 \longrightarrow$  เซลล์ยีสต์ (100 กรัม)

ดังนั้น ปริมาณความร้อนที่ใช้เพื่อการสร้างส่วนต่างๆของเซลล์

$$\begin{aligned}\Delta H_{\text{rxn}} &= (4.63 \times 394.133) + (3.84 \times 285.767) - (1,518.792) \\ &= 1,403.399 \text{ kJ/100 g cell}\end{aligned}$$

ผลได้ของการเจริญที่พิจารณาจากพลังงาน ATP ( $Y_{\text{ATP}}$ )

พลังงานที่อยู่ในรูปของ ATP ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมานั้น จะนำไปใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึม ทั้งการสร้างเซลล์หรือปลดปล่อยออกมาในรูปของพลังงานความร้อน และเมื่อเทียบกับปริมาณเซลล์ที่เพิ่มขึ้น

$$\text{จะได้ } Y_{\text{ATP}} = \Delta X / \Delta \text{ATP}$$

$$\text{หรือ } Y_{\text{ATP}} = \mu / Q_{\text{ATP}}$$

เมื่อ  $Q_{\text{ATP}}$  เป็นอัตราจำเพาะของการสังเคราะห์ ATP

ตารางที่ 12 แสดงค่า  $Y_{ATP}$  ของเชื้อจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ

ชนิดจุลินทรีย์	สับสเตรต	$Y_{ATP}$ (g/mole)
<i>Aerobacter aerogenes</i>	glucose	10.3
	fructose	10.7
	mannitol	10.0
	gluconic acid	11.0
<i>Aerobacter cloccae</i>	glucose	11.5
<i>Actinomyces israeli</i>	glucose	12.5
<i>Bifidobacterium bifidum</i>	glucose	13.1
	lactose	10.4
	galactose	9.9
	mannitol	11.8
<i>Clostridium bifidum</i>	glutamic acid	10.9
<i>Clostridium thermoaceticum</i>	glucose	10.0
<i>Desulforibrio desulfuricans</i>	pyruvic acid	9.6
<i>Escherichia coli</i>	glucose	9.4
<i>Lactobacillus plantarum</i>	glucose	9.4
<i>Streptococcus faecalis</i>	glucose	11.5
	arginine	10.0



ตัวอย่างที่ 23 ถ้าองค์ประกอบต่างๆภายในเซลล์ต้องการใช้ ATP ดังแสดงในตารางที่ 13 จงคำนวณผลได้ของการเจริญที่พิจารณาจาก ATP เมื่อกำหนดให้  $Y_{ATP}$  เท่ากับ 10.5 กรัมของเซลล์แห้งต่อโมลของ ATP

ตารางที่ 13 แสดงปริมาณ ATP ที่ต้องการในแต่ละองค์ประกอบ

	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ปริมาณ ATP ที่ต้องการ
ดีเอ็นเอ	5	$330 \times 10^{-4}$
อาร์เอ็นเอ	10	$373.2 \times 10^{-4}$
โปรตีน	70	$391.1 \times 10^{-4}$
พอลิแซคคาไรด์	5	$123.6 \times 10^{-4}$
ลิปิด	10	$114.8 \times 10^{-4}$

วิธีทำ เมื่อพิจารณาเซลล์แบคทีเรีย 100 กรัม ปริมาณของ ATP ที่ต้องการแสดงได้ดังนี้

$$\text{ดีเอ็นเอ} = 5 \times 330 \times 10^{-4} = 1,650 \times 10^{-4} \text{ โมล}$$

$$\text{อาร์เอ็นเอ} = 10 \times 373.2 \times 10^{-4} = 3,732 \times 10^{-4} \text{ โมล}$$

$$\text{โปรตีน} = 70 \times 391.1 \times 10^{-4} = 27,377 \times 10^{-4} \text{ โมล}$$

$$\text{พอลิแซคคาไรด์} = 5 \times 123.6 \times 10^{-4} = 618 \times 10^{-4} \text{ โมล}$$

$$\text{ลิปิด} = 10 \times 114.8 \times 10^{-4} = 1,148 \times 10^{-4} \text{ โมล}$$

$$\text{รวมทั้งสิ้น} = 34,525 \times 10^{-4} \text{ โมล}$$

เมื่อเทียบเป็นสัดส่วนของพลังงานที่ใช้เพื่อการสร้างสารต่างๆเป็นร้อยละ ได้ดังนี้

$$\text{ดีเอ็นเอ} \quad 4.7$$

$$\text{อาร์เอ็นเอ} \quad 10.8$$

$$\text{โปรตีน} \quad 79.3$$

$$\text{พอลิแซคคาไรด์} \quad 1.8$$

$$\text{ลิปิด} \quad 3.3$$

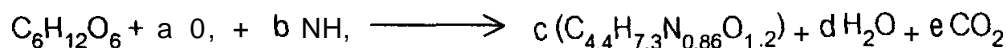
ดังนั้น จำนวน ATP ที่ต้องการต่อปริมาณแบคทีเรีย 1 กรัม

$$\text{เท่ากับ } \frac{34,525 \times 10^{-4}}{100} = 345 \times 10^{-4} \text{ โมลต่อกรัม}$$

จำนวน ATP ที่ต้องการเพื่อการสร้างเซลล์ =  $1/10.5$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นผลได้ของการใช้ ATP} &= 345 \times 10^{-4} \times 10.5 \times 100 \\ &= 36.2 \% \end{aligned}$$

**ตัวอย่างที่ 24** จากการเพาะเลี้ยงเชื้อที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน เพื่อเพิ่มจำนวนเซลล์นั้น พบว่าปริมาณกลูโคส 2 ใน 3 ส่วนโดยน้ำหนักเท่านั้น ที่ถูกเปลี่ยนเป็นเซลล์ที่เพิ่มขึ้น โดยสมการที่เกี่ยวข้องแสดงได้ดังนี้



จงคำนวณสัมประสิทธิ์ของมวลสารสัมพันธ์

วิธีทำ ปริมาณคาร์บอนในสับสเตรต 1 โมล = 72 g

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณคาร์บอนที่ถูกเปลี่ยนเป็นเซลล์} &= \frac{72 \times 2}{3} \\ &= 48 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้น  $48 = 4.4 c (12)$

$$c = 0.909$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณคาร์บอนที่เปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์} &= 72 - 48 \\ &= 24 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้น  $24 = 12 e$

$$e = 2$$

สมดุลของไนโตรเจน

$$14b = 0.86c \quad (14)$$

$$b = 0.782$$

สมดุลของไฮโดรเจน

$$12 + 3b = 7.3c + 2d$$

$$d = 3.854$$

สมดุลของออกซิเจน

$$6(16) + 2(16)a = 1.2(16)c + 2(16)e + 16d$$

$$a = 1.473$$

$$Y_{X/S} = \frac{(0.909)(91.34)}{180}$$

$$180$$

$$= 0.461 \text{ g/g}$$

$$Y_{X/O_2} = \frac{(0.909)(91.34)}{(1.437)(32)}$$

$$(1.437)(32)$$

$$= 1.76 \text{ g/g}$$

ตัวอย่างที่ 25 เมื่อกำหนดให้สัดส่วนของคาร์บอนที่มีในเซลล์ยีสต์ เป็น 0.45 จงคำนวณสมดุลต่างๆที่เกิดขึ้น เมื่อกำหนดให้อัตราการเจริญจำเพาะของยีสต์เป็น 0.2 ต่อชั่วโมง และสมการดังนี้



วิธีทำ จาก  $\mu = 0.2 \text{ h}^{-1}$

ดังนั้น  $d = \frac{0.2 \times 0.45}{12}$

$$12$$

$$= 7.5 \times 10^{-3} \text{ mot C (g dry cell)}^{-1} \text{ h}^{-1}$$

$$\begin{aligned}
 \text{มวลโมเลกุลของเซลล์จะประกอบด้วยคาร์บอน} &= 12 \text{ กรัม} \\
 \text{ดังนั้นมวลโมเลกุลของเซลล์} &= \frac{12 \times 100}{45} \\
 &= 26.67 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

จากสมการของเซลล์ จะได้

$$26.67 = 12 + \alpha (1) + \beta (16) + \gamma (14)$$

$$14.67 = \alpha + 16\beta + 14\gamma$$

สมการที่ 21

โดยที่

$$a = q_{\text{glucose}}$$

$$= \mu / Y_{X/S}$$

$$= 0.2190$$

$$= 2.22 \times 10^{-3} \text{ mol glucose / g / h}$$

$$b = q_{\text{glut}}$$

$$= 0.043 \text{ 1147}$$

$$= 0.29 \times 10^{-3} \text{ mol glut / g/h}$$

$$\text{สมดุลของคาร์บอน} \quad 6a + 5b = d + e$$

สมการที่ 22

$$\text{สมดุลของไฮโดรเจน} \quad 12a + 9b = \alpha d + 2f$$

สมการที่ 23

$$\text{สมดุลของออกซิเจน} \quad 6a + 4d = \beta d + f$$

สมการที่ 24

$$\text{สมดุลของไนโตรเจน} \quad b = \gamma d$$

สมการที่ 25

$$\text{จากสมการที่ 22} \quad e = 6a + 5b - d$$

$$= 6(2.2 \times 10^{-3}) + 5(0.29 \times 10^{-3}) - (7.15 \times 10^{-3})$$

$$\text{จากสมการที่ 25} \quad \gamma = b/d$$

$$= 0.29 \times 10^{-3} / 7.5 \times 10^{-3}$$

$$= 0.0367$$

เมื่อรวมสมการที่ 23 และสมการที่ 24

$$\begin{aligned} b &= \alpha d - 2\beta d \\ &= 0.29 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

สมการที่ 26

จากสมการที่ 21

$$\begin{aligned} 14.67 d &= \alpha d + 16\beta d + 14\gamma d \\ &= 110 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$106 \times 10^{-3} = \alpha d - 16\beta d$$

สมการที่ 27

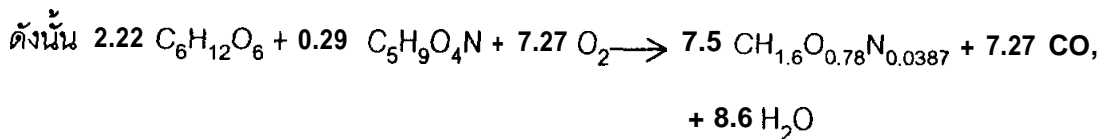
$$\begin{aligned} &= \frac{105.71 \times 10^{-3}}{18 \times 7.5 \times 10^{-3}} \\ &= 0.78 \end{aligned}$$

จากสมการที่ 26  
ดังนั้น

$$\begin{aligned} \alpha d S &= b + 2\beta d \\ a &= \frac{b + 2\beta d}{d} \\ &= \frac{(0.29 \times 10^{-3}) + (2 \times 0.78) + (7.5 \times 10^{-3})}{7.5 \times 10^{-3}} \\ &= 1.6 \end{aligned}$$

จากสมการที่ 24

$$\begin{aligned} f &= 6a + 4b - \beta d \\ &= (6 \times 2.22 \times 10^{-3}) + (4 \times 0.29 \times 10^{-3}) - (0.78 \times 7.5 \times 10^{-3}) \\ &= 8.6 \times 10^{-3} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \frac{\text{ปริมาณคาร์บอนในผลิตภัณฑ์}}{\text{ปริมาณคาร์บอนในสารตั้งต้น}} &= \frac{7.5 + 7.27}{(2.22 \times 6) + (0.29 \times 5)} \\ &= \frac{14.77}{14.77} \\ &= 1 \end{aligned}$$

---

---