เรื่องที่ 7 การสลายสารอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic respiration)

สาระที่ 1 สิ่งมีชีวิตกับกระบวนการดำรงชีวิต

มาตรฐาน ว 1.1 : เข้าใจหน่วยพื้นฐานของสิ่งมีชีวิต ความสัมพันธ์ของโครงสร้างและหน้าที่ของระบบต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตที่ทำงานสัมพันธ์กัน มีกระบวนการสืบเสาะหาความรู้สื่อสารสิ่งที่เรียนรู้และนำความรู้ไปใช้ในการดำรงชีวิตของตนเองและดูแลสิ่งมีชีวิต

ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง

1. สำรวจตรวจสอบ สืบค้นข้อมูล อภิปรายและสรุปเกี่ยวกับโครงสร้างและการทำงานของระบบย่อยอาหารและการสลายสารอาหารเพื่อให้ได้พลังงานในร่างกายของสัตว์และมนุษย์

จุดประสงค์การเรียนรู้

1. อภิปรายและสรุปปฏิกิริยาการสลายสารอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจน

เนื้อหา

การสลายสารอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic respiration)

1. การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนในเซลล์ยีสต์
2. การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนของเซลล์กล้ามเนื้อ

สรุปการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน

เกม

แบบทดสอบ

เรื่องที่ 7 การสลายสารอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic respiration)

การสลายสารอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic respiration)

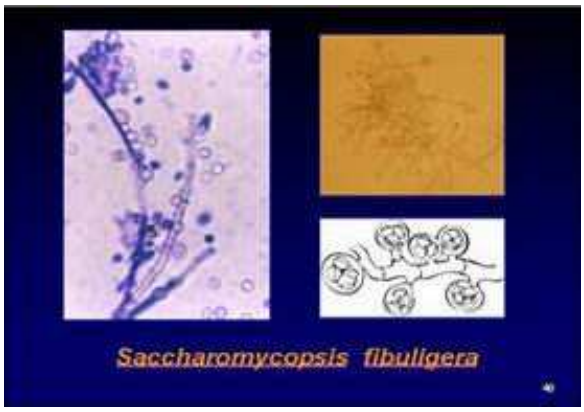
การสลายสารอาหารไม่จำเป็นต้องใช้ออกซิเจนเสมอไป สิ่งมีชีวิตบางชนิด เนื้อเยื่อบางอย่างได้พลังงานมาจากการสลายอาหารโดยไม่ใช้ออกซิเจน ได้แก่ พยาธิตัวตืด ยีสต์ เมล็ดพืช แบคทีเรียบางชนิด ส่วนกล้ามเนื้อลายเป็นตัวอย่างของเนื้อเยื่อสัตว์ชั้นสูงที่สามารถสลายสารอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้

การสลายสารอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic respiration) ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

1. ไกลโคลิซีส (Gycolysis)
2. การหมัก (Fermentation)

การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนของสิ่งมีชีวิตต่างชนิดกันจะให้ผลลัพธ์ จากปฏิกิริยาบางขั้นตอนไม่เหมือนกัน เช่น

1. การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนในเซลล์ยีสต์ ในสภาวะที่ไม่มีแก๊สออกซิเจนหรือแก๊สออกซิเจนไม่เพียงพอจะทำให้ NADH และ $FADH_2$ ถ่ายทอดอิเล็กตรอนให้กับตัวรับอิเล็กตรอนต่าง ๆ ที่ฝังตัวอยู่ในเยื่อหุ้มชั้นในของไมโทคอนเดรียได้ เนื่องจากขาดแก๊สออกซิเจนซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในขั้นตอนสุดท้าย จึงไม่สามารถสร้าง ATP ได้ และมีการสะสม NADH และ $FADH_2$ มากขึ้นจึงทำให้ขาดแคลน NAD^+ และ FAD มีผลให้ปฏิกิริยาไกลโคลิซีส วัฏจักรเครบส์ และการถ่ายทอดอิเล็กตรอนดำเนินต่อไปไม่ได้ และยังทำให้เซลล์ขาด ATP เซลล์จึงมีกระบวนการผันกลับให้ NADH กลายเป็น NAD^+ เพื่อให้กระบวนการไกลโคลิซีสไม่หยุดชะงัก และสามารถสร้าง ATP ต่อไปได้ กระบวนการนี้ เรียกว่า **กระบวนการหมัก (Fermentation)**



ภาพที่ 7.1 ภาพขวายีสต์ในลูกแป้ง คือ แซคคาโรไมคอปซิส ฟิบูลิจอร่า (*Saccharomycopsis fibuligera*) ภาพซ้ายยีสต์แซคคาโรไมซิส ซิริวิซิอี (*Saccharomyces cerevisiae*) ซึ่งเป็นยีสต์ที่ใช้ทำไวน์

ที่มา : www.surathai.net/images/1102996611/yeast01.jpg

กระบวนการหมักแอลกอออล์ (Alcoholic fermentation) โดยเริ่มจากไกลโคลิซีส เช่นเดียว กับการสลายกลูโคสโดยใช้ออกซิเจน และได้กรดไพรูวิก 2 โมเลกุล พร้อมปล่อย ATP 2 โมเลกุล และ 4 ไฮโดรเจน อะตอม เช่นกัน แต่ NADH + H^+ จะถ่ายทอดอะตอมของไฮโดรเจนไปยัง acetaldehyde ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีคาร์บอน 2 อะตอม ทำให้ไม่สามารถใช้พลังงานจากอิเล็กตรอนที่มีอยู่ในอะตอมของไฮโดรเจนมาสร้าง ATP ได้อีก ดังนั้นการสลายกลูโคส 1 โมเลกุล จึงได้ ATP เพียง 2 โมเลกุล เอทิลแอลกอฮอล์เป็นสารพิษเป็นอันตรายต่อเซลล์ ถ้ามีเอทิลแอลกอฮอล์มากๆ ยีสต์อาจทนไม่ได้และตายในที่สุด

รวมสมการไกลโคลิซีส

$$C_6H_{12}O_6 + 2ATP + 2\ ADP + 2Pi + 2\ NAD^+ \xrightarrow{\text{Enzyme}} 2\ C_3H_4O_3 + 4ATP + 2NADH + 2H^+$$

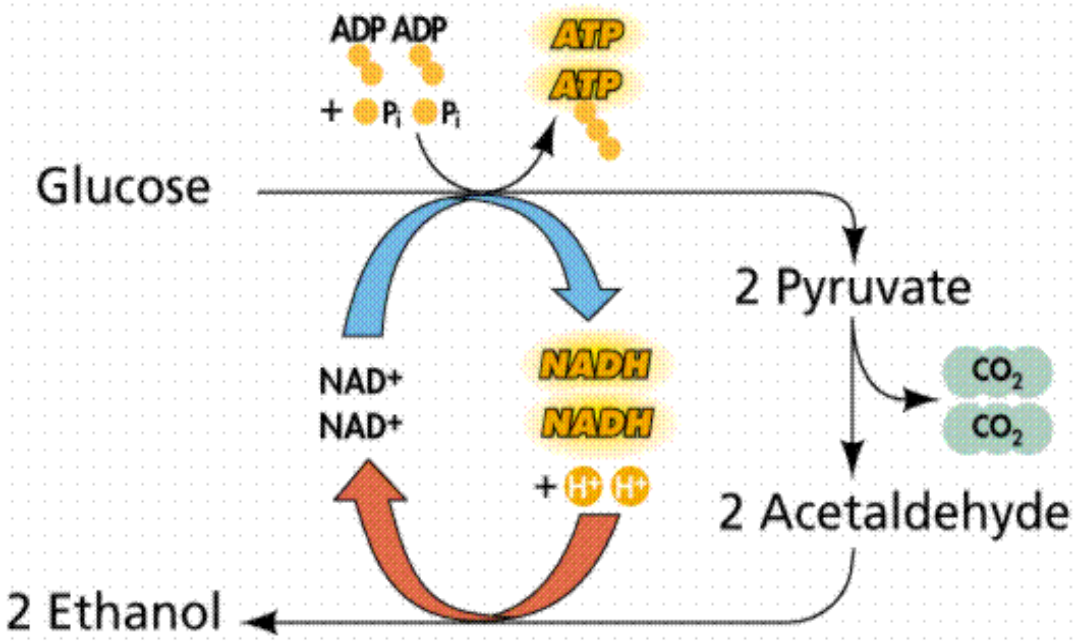
ต่อจากนั้นกรดไพรูวิกจะเปลี่ยนเป็นแอซีทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) เป็นสารประกอบที่มีคาร์บอน 2 อะตอม และได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเอนไซม์ไพรูเวตดีคาร์บอกซีเลส (Pyruvate decarboxylase) ดังสมการ

$$2\ C_3H_4O_3 \xrightarrow{\text{Pyruvate decarboxylase}} 2\ C_2H_4O + 2CO_2$$

ปฏิกิริยาต่อไป แอซิทิลดีไฮด์จะถูกออกซิไดซ์ด้วย NADH + H^+ เป็นเอทิลแอลกอฮอล์หรือเอทานอล โดยเอนไซม์แอลกอฮอล์ดีไฮโดรจีเนส (Alcohol dehydrogenase)

$$2\ C_2H_4O + 2NADH + 2H^+ \xrightarrow{\text{Alcohol dehydrogenase}} 2\ C_2H_5OH + 2\ NAD^+ + 2CO_2$$

สรุปกระบวนการหมัก การหมักเป็นการปลดปล่อยพลังงานแบบไม่ใช้ออกซิเจน เกิดขึ้นในไซโทพลาสซึม โดยใช้ไพรูเวตจากไกลโคลิซีสเป็นสารตั้งต้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการหมักจะมีการสร้าง NAD^+ ขึ้นมาใหม่ แต่จะไม่มีการสร้าง ATP เพิ่มอีก ดังนั้นการสลายกลูโคสแบบไม่ใช้ออกซิเจนจึงสร้าง ATP ได้เพียง 2 โมเลกุล จากไกลโคลิซีสเท่านั้น



ภาพที่ 7.2 แผนภาพแสดง Alcoholic fermentation

ที่มา : www.emc.maricopa.edu/.../BIOBK/alcferm.gif

การหมักแอลกอฮอล์ถูกนำมาใช้ประโยชน์ ในการผลิตเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ เช่น เบียร์ สุรา ไวน์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งกรรมวิธีแตกต่างกันไป ในปัจจุบันได้มีการนำความรู้นี้ไปผลิตแอลกอฮอล์จากของเหลือใช้ เช่น การผลิตแอลกอฮอล์จากกากน้ำตาล มีผลทำให้ลดปัญหามลภาวะจากกากน้ำตาลได้เป็นจำนวนมาก แอลกอฮอล์ยังเป็นสารที่มีพลังงานแฝงอยู่มาก สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ ยีสต์จะหมักแอลกอฮอล์ได้สูงสุดประมาณ 12 % (ถ้าสูงกว่านี้จะเป็นอันตรายต่อเซลล์)

ยีสต์สามารถสลายสารอาหารได้ทั้งในสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน ในสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจนยีสต์จะเจริญเติบโตได้ดีกว่า เพราะจะนำออกซิเจนไปสลายสารอาหารให้ได้พลังงานมากกว่า

ยีสต์ชนิดที่ใช้ในการทำขนมปังมีชื่อว่า *Saccharomyces cercvisiae* ในระหว่างการหมักแป้งยีสต์จะเกิดปฏิกิริยาการหมักแอลกอฮอล์ และเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นทำให้แป้งพองฟู เมื่อนำไปอบแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกไล่ออกไปพร้อมกับแอลกอฮอล์

สมการรวม Alcoholic fermentation ของ ราและยีสต์ จากกลูโคส 1 โมเลกุล

$$C_6H_{12}O_6 + 2\ ADP + 2Pi \longrightarrow 2\ C_2H_5OH + 2\ ATP + 2CO_2$$

2. การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนของเซลล์กล้ามเนื้อ พยาธิตัวตืด และแบคทีเรียบางชนิด กรดไพรูวิกจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนได้เป็นกรดแลกติก

ภาพที่ 7.3 การออกกำลังกายของกล้ามเนื้อลาย
ที่มา : www.thaifreenews.com/UserFiles/Image/detail11...

ใน 1 นาที ปอดจะมีการแลกเปลี่ยนแก๊สได้มากที่สุดประมาณ 5,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร แต่ในขณะที่เราออกกำลังกายจะมีพลังงานที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนแก๊สสูงถึง 24,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที แต่ปอดมีความจุเพียง 5,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นพลังงานส่วนเกินประมาณ 5 เท่านี้มาจากไหน

พบว่าในขณะที่เราออกกำลังกาย เลือดจะมีกรดแลกติก (Lactic acid) สูงพร้อม ๆ กับการทำงานหนักของกล้ามเนื้อลาย

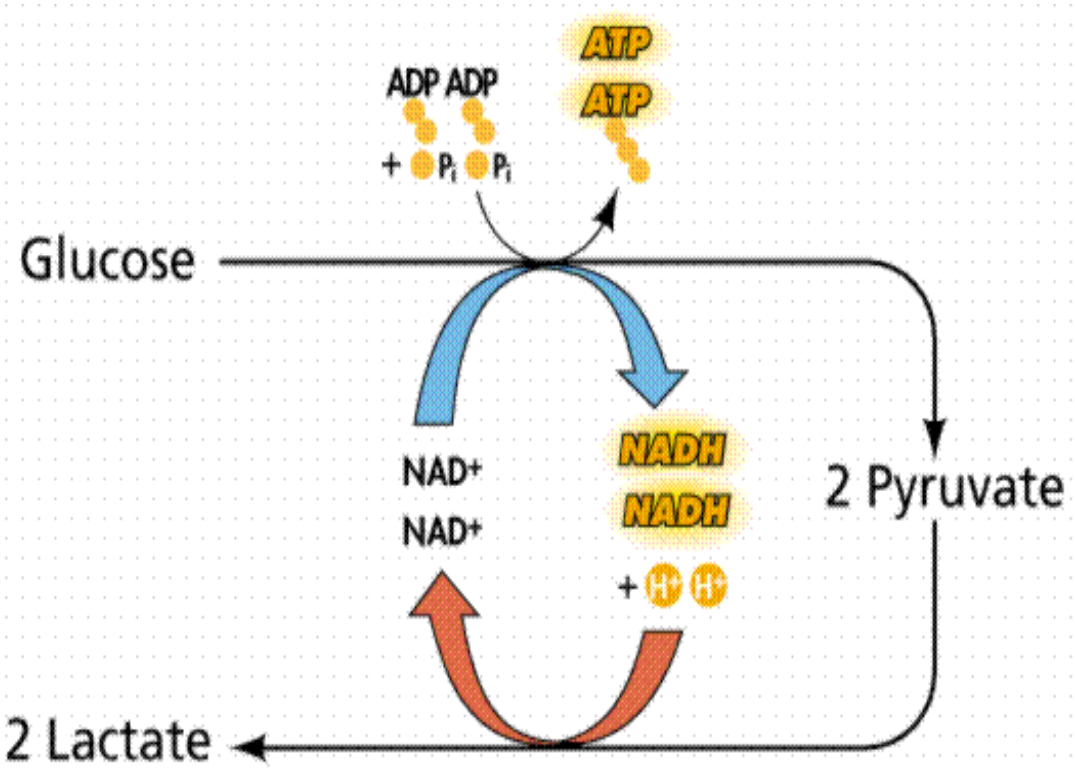
ในสภาวะที่ร่างกายขาดออกซิเจนหรือได้รับแก๊สออกซิเจนไม่เพียงพอ การสลายกลูโคสในเซลล์กล้ามเนื้อจะไม่สมบูรณ์ และไม่เข้าสู่วัฏจักรเครบส์และระบบถ่ายทอดอิเล็กตรอน แต่จะสลายไปสู่กรดแลกติกหรือแลกเตดโดยตรง ทำให้ได้พลังงานน้อยมากเพียง 2 ATP ต่อกลูโคส 1 โมเลกุลเท่านั้น แต่กรดแลกติกสามารถเปลี่ยนไปเป็นกรดไพรูวิก หรือไพรูเวตแล้วเข้าสู่วัฏจักรเครบส์ได้ต่อไปอีก สำหรับกรดแลกติกถ้าหากมีสะสมอยู่ในกล้ามเนื้อมาก ๆ ทำให้กล้ามเนื้อล้าจนกระทั่งทำงานไม่ได้ต้องได้รับแก๊สออกซิเจนมาชดเชย เพื่อสลายกรดแลกติกต่อไปจนสมบูรณ์

ได้น้ำ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะถูกกำจัดออกนอกร่างกายได้ การหายใจแบบไม่ใช้แก๊สออกซิเจนแล้วเกิดกรดแลกติก ($C_3H_6O_3$) จึงเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า **การหมักกรดแลกติก (Lactic acid fermentation)**

การหมักแลกเทต NAD^+ ถูกสร้างขึ้นมาโดย NADH (จากไกลโคลิซีส) ให้อิเล็กตรอนและไฮโดรเจนแก่ไพรูเวตโดยตรง ทำให้เกิดแลกเทตขึ้น 2 โมเลกุล ดังสมการ

สมการ Lactic acid fermentation ของเซลล์กล้ามเนื้อลาย จากกลูโคส 1 โมเลกุล

$$C_6H_{12}O_6 + 2\ ADP + 2Pi \longrightarrow 2\ C_3H_6O_3$$



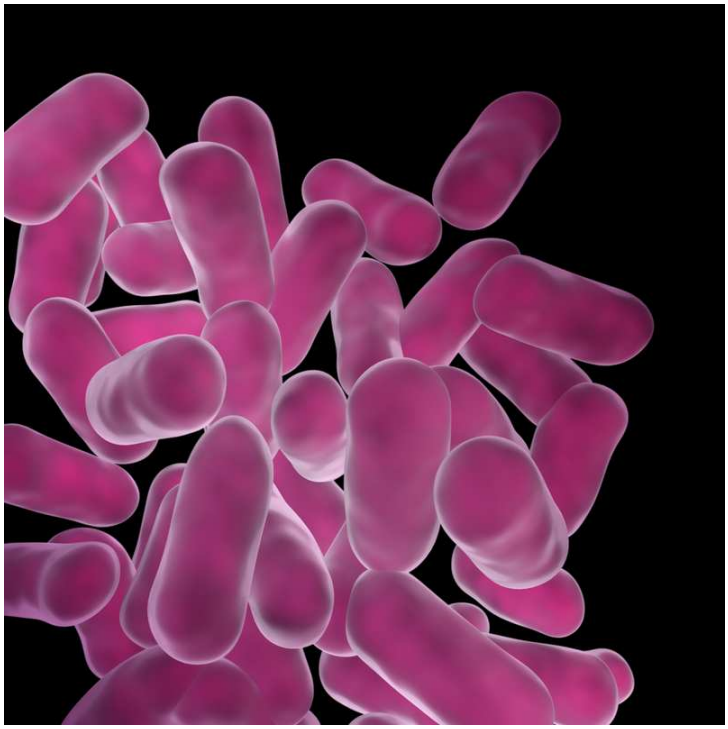
ภาพที่ 7.4 แผนภาพแสดง Lactic acid fermentation

ที่มา : www.emc.maricopa.edu/.../BIOBK/alcferm.gif

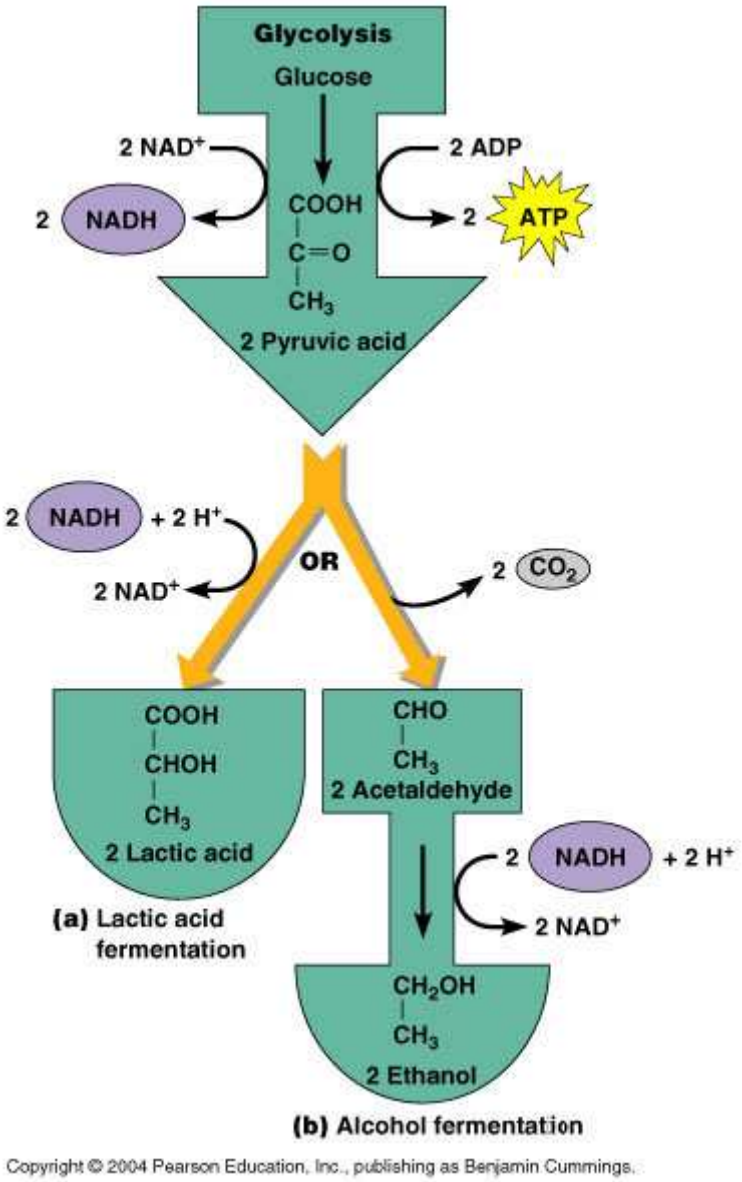
กรดแลกติกที่เกิดจากกระบวนการหมักจะมีการลำเลียงออกจากเซลล์กล้ามเนื้อไปยังตับเพื่อสังเคราะห์กลับเป็นกลูโคสซึ่งร่างกายสามารถนำไปใช้ต่อไปได้ ส่วนกรณีการปวดเมื่อยของกล้ามเนื้อที่เกิดขึ้นพบว่าเป็นผลมาจากการสะสมของกรดต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการไกลโคลิซีส

ดังนั้นถึงแม้ว่าจะมีความเข้มข้นของกรดแลกติกสูงก็ไม่มีอาการปวดเมื่อยของกล้ามเนื้อถ้าร่างกายสามารถรักษาสมดุลของกรด-เบสไว้ได้

มีแบคทีเรียบางชนิด เช่น แลกโตบาซิลลัส (Lactobacillus) สามารถสลายสารอาหารโดยไม่ใช้แก๊สออกซิเจน ทำให้เกิดกรดแลกติก เราจึงนำจุลินทรีย์เหล่านี้มาใช้ประโยชน์ในการหมักหรือผลิตอาหารบางชนิด เช่น นมเปรี้ยว โยเกิร์ต เต้าหู้ยี้ การดองผักและผลไม้ต่าง ๆ



ภาพที่ 7.5 ภาพแบคทีเรียแลกโตบาซิลลัส (Lactobacillus)
ที่มา : www.jarrowprobiotics.com/images/lactobacillus.jpg



ภาพที่ 7.6 แผนภาพสรุป Lactic fermentation และ Alcohol fermentation

ที่มา : www. classes.midlandstech.edu/carterp/Courses/bio2.

สรุปการสลายสารอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจน

1. อาหารสลายตัวไม่สมบูรณ์ (ปฏิกิริยาการสลายกลูโคสสิ้นสุดลงแค่ขั้นไกลโคลิซีส)
2. ถ้าเป็นในพืชและยีสต์ผลสุดท้ายจะได้ เอทิลแอลกอฮอล์ + CO_2 + 2 ATP สำหรับในสัตว์ผลสุดท้ายได้ กรดแลกติก (Lactic acid)
3. ถ้าเป็นในพืชและยีสต์เกิด CO_2 ขึ้นแต่ถ้าเป็นสัตว์ไม่เกิด CO_2 ขึ้น
4. ไม่เกิด H_2O
5. ได้พลังงานน้อยกว่าการหายใจแบบใช้แก๊สออกซิเจน 18 – 19 เท่า

6. เกิดในไซโทพลาสซึมเท่านั้น

การสลายสารอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้อาจเกิดขึ้นได้ทั้งในพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ ตัวอย่างเช่น พืชที่อยู่ในภาวะน้ำท่วมทำให้รากได้รับออกซิเจนไม่เพียงพอ เซลล์ที่รากจึงต้องสลายสารอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นต้น

การสลายสารอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจนทั้ง 2 แบบดังกล่าวเป็นการสลายสารอาหารที่ไม่สมบูรณ์ เพราะเอทิลแอลกอฮอล์และกรดแกลติกที่เป็นผลิตภัณฑ์ของกระบวนการสลายสารอาหารแฝงอยู่จำนวนมาก

.....