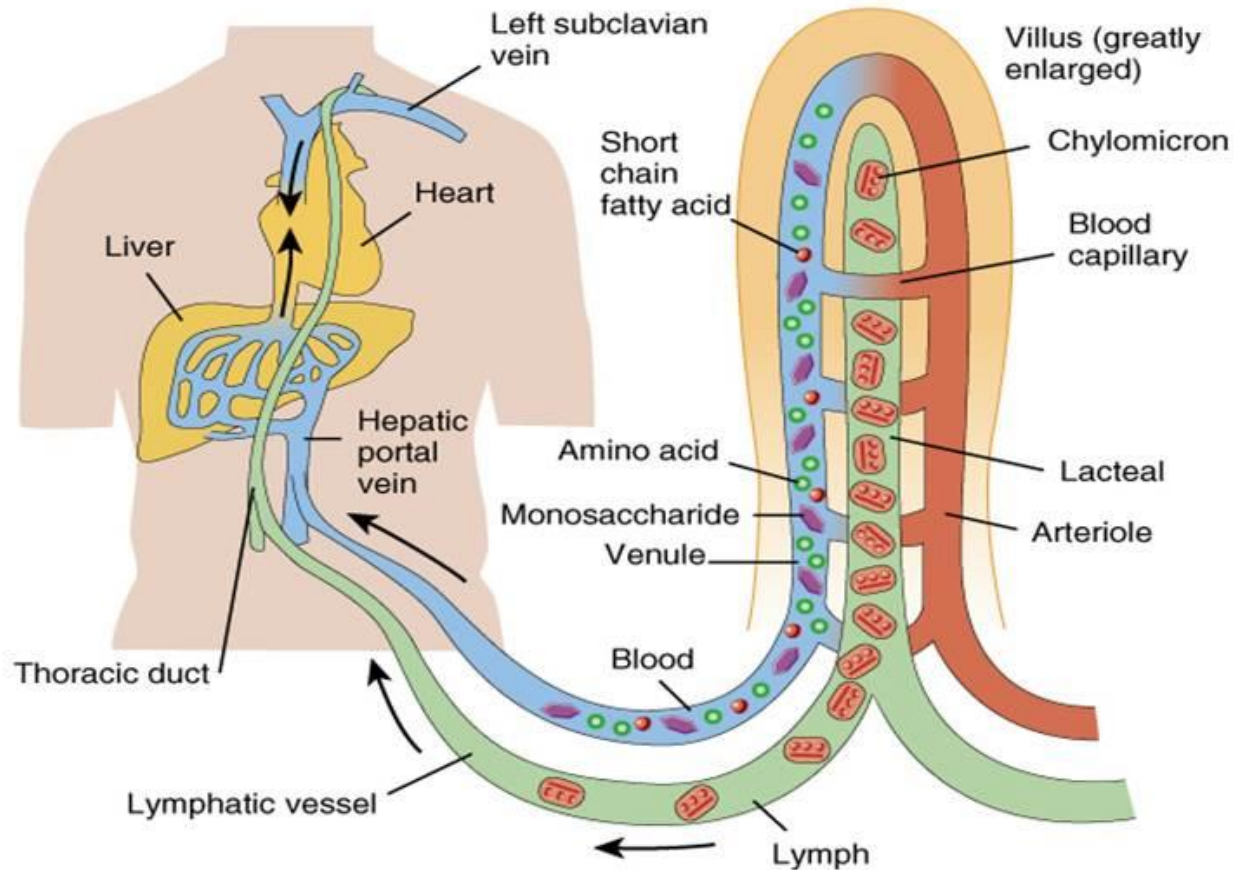


การย่อย การดูดซึม และการขนส่งอาหาร

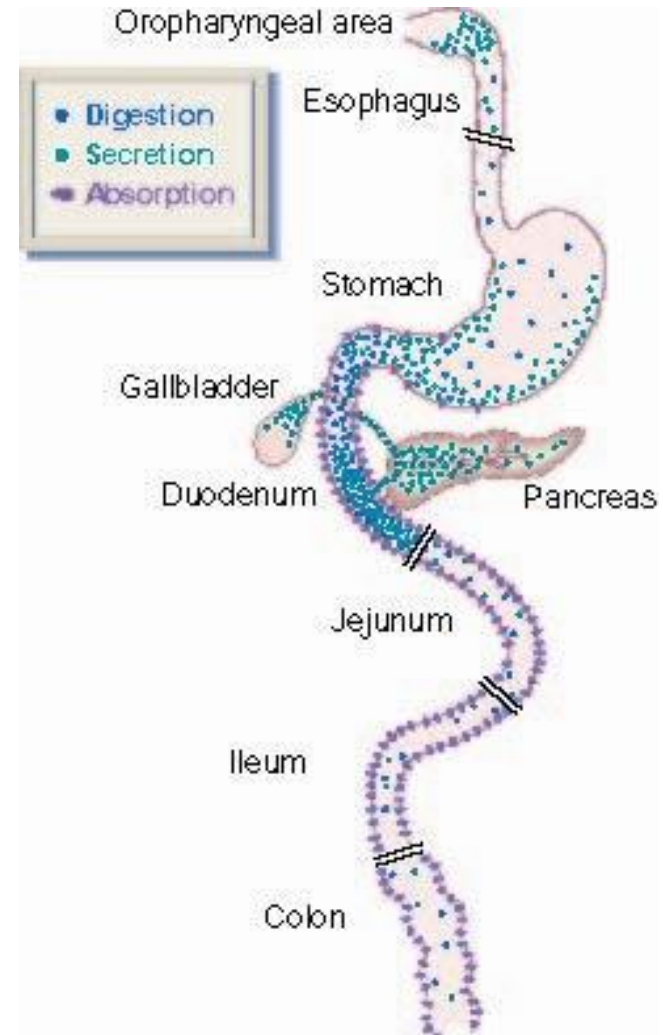


Sites of secretion, digestion and absorption

ย่อยอาหารขนาดใหญ่ให้เป็น
สารอาหารขนาดเล็ก

เปลี่ยนสภาพอาหารไม่ละลายน้ำ
เป็นสภาพที่ละลายน้ำได้
ช่วยในการย่อยและดูดซึม

การย่อยอาหารโดยเอนไซม์



การย่อยอาหารในปาก

อาหารถูกบดเป็นชิ้นเล็ก

คลุกเคล้ากับน้ำลายที่มีเอนไซม์และโปรตีน

ในปากจะมีการย่อยแป้ง

โดยเอนไซม์ amylase จากต่อมน้ำลาย

เอนไซม์ maltase, lipase, protease มีเพียงเล็กน้อย

การย่อยอาหารในกระเพาะอาหาร

ทำให้อาหารชิ้นเล็กลงอีก

คลุกเคล้ากับน้ำย่อยมีลักษณะเรียกว่า **chyme**

1. หลังน้ำย่อยและสารต่าง ๆ

pepsinogen หลังจาก chief cells

HCL หลังจาก parietal cells กระตุ้น pepsinogen

intrinsic factor สังเคราะห์จาก parietal cells

ช่วยดูดซึม Vit B12

2. ย่อยโปรตีนโดย เอนไซม์ pepsinogen → pepsin

3. **Gastric emptying time** เวลาอาหารผ่านกระเพาะ

ใช้เวลา 2-5 ชม ขึ้นกับชนิดอาหาร

การย่อยอาหารในลำไส้

การย่อยอาหารส่วนใหญ่เกิดบริเวณลำไส้เล็ก

ที่ลำไส้จะมีน้ำหลังจาก

1. ตับ หลั่งน้ำดี ช่วยในการย่อยอาหารและการดูดซึมลิพิด
2. ตับอ่อน -amylase
 -lipase
 -trypsinogen → trypsin
 -chymotrypsinogen → chymotrypsin
 -Procarboxypeptidase → carboxypeptidase
 -Proelastase → elastase
3. ลำไส้เล็ก -disaccharidase
 -aminopeptidase

การดูดซึมสารอาหาร

การดูดซึมสารอาหารเกิดบริเวณลำไส้เล็ก

ลำไส้เล็กยาว **3-4** เมตร

ที่เยื่อบุ **villi** ยื่นออกมาช่วยเพิ่มพื้นผิวการดูดซึม **600** เท่า

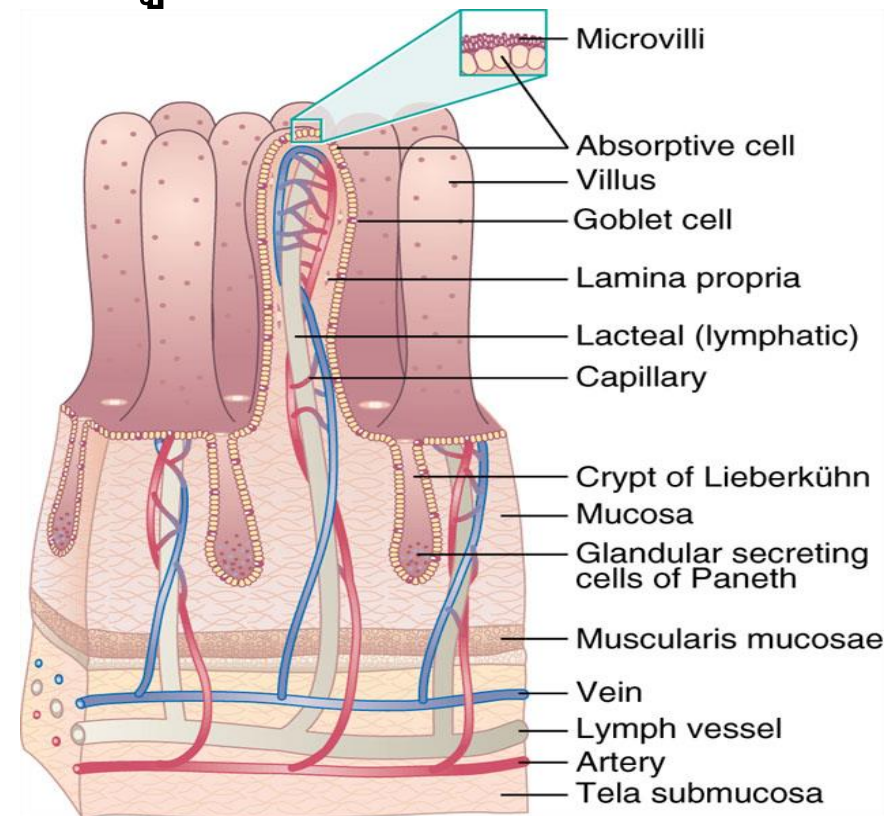
เซลล์ลำไส้มีเอนไซม์ย่อยอาหาร เช่น

-disaccharidase

-aminopeptidase

หลอดเลือด เส้นประสาท

และหลอดน้ำเหลือง อยู่ภายใน



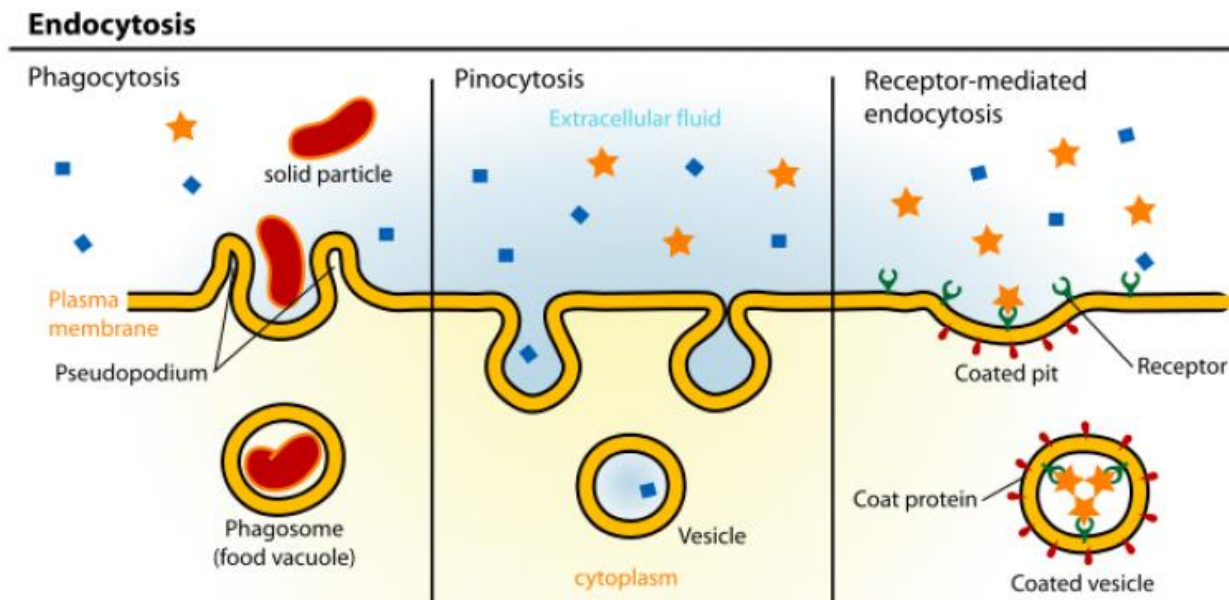
การดูดซึมสารอาหาร

Pinocytosis

Simple diffusion

Facilitated diffusion

Active transport



การนำส่งสารอาหาร

- สารอาหารที่โมเลกุลมีขั้ว :

monosaccharides, amino acids, water soluble vitamin

จะถูกดูดซึมเข้าเซลล์ลำไส้เล็ก และเส้นเลือดฝอยดำ

แล้วเข้าสู่ portal vein

เพื่อนำไปที่ตับ

สารอาหารบางส่วนจะถูกเก็บไว้ใช้ที่เซลล์ตับ

และบางส่วนปล่อยเข้าสู่ **blood circulation**

เพื่อนำไปให้เซลล์อื่นๆ (extra-hepatic cells)

- สารอาหารโมเลกุลไม่มีละลายน้ำ :

fatty acid, cholesterol, fat soluble vitamin

เมื่อดูดซึมเข้าเซลล์ลำไส้เล็ก จะรวมกับ **phospholipids** และ **proteins**

ได้เป็นอนุภาคเล็กๆ ที่ละลายน้ำได้ **lipoprotein**

lipoprotein ที่สร้างที่เซลล์ลำไส้นี้มีชื่อว่า **chylomicron**

การย่อยคาร์โบไฮเดรต

อาหารคาร์โบไฮเดรตที่รับประทานประกอบด้วย

Starch	60%
--------	-----

Sucrose	30%
---------	-----

Lactose	10%
---------	-----

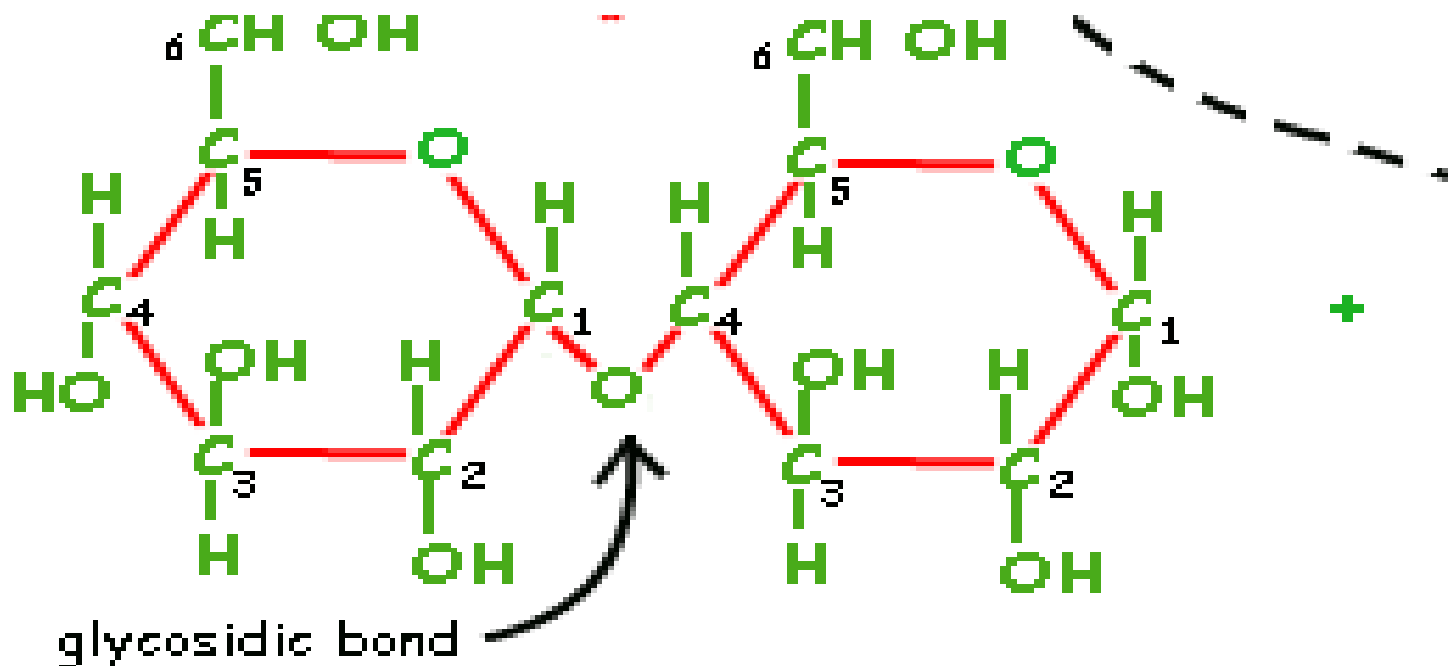
Glycogen, glucose, fructose

เอนไซม์ย่อยคาร์โบไฮเดรต

Starch: ใช้เอนไซม์ amylase จากน้ำลาย ตับอ่อน

ย่อยตำแหน่ง $\alpha 1,4$ glycosidic bond

ได้ oligosaccharide, dextrin, maltose, glucose



เอนไซม์ย่อยคาร์โบไฮเดรต

เซลล์ผนังลำไส้

Brush border of intestinal mucosal cells

Oligosaccharidase:

ย่อย oligosaccharide

Dextrinase: ย่อย dextrin

Disaccharides:

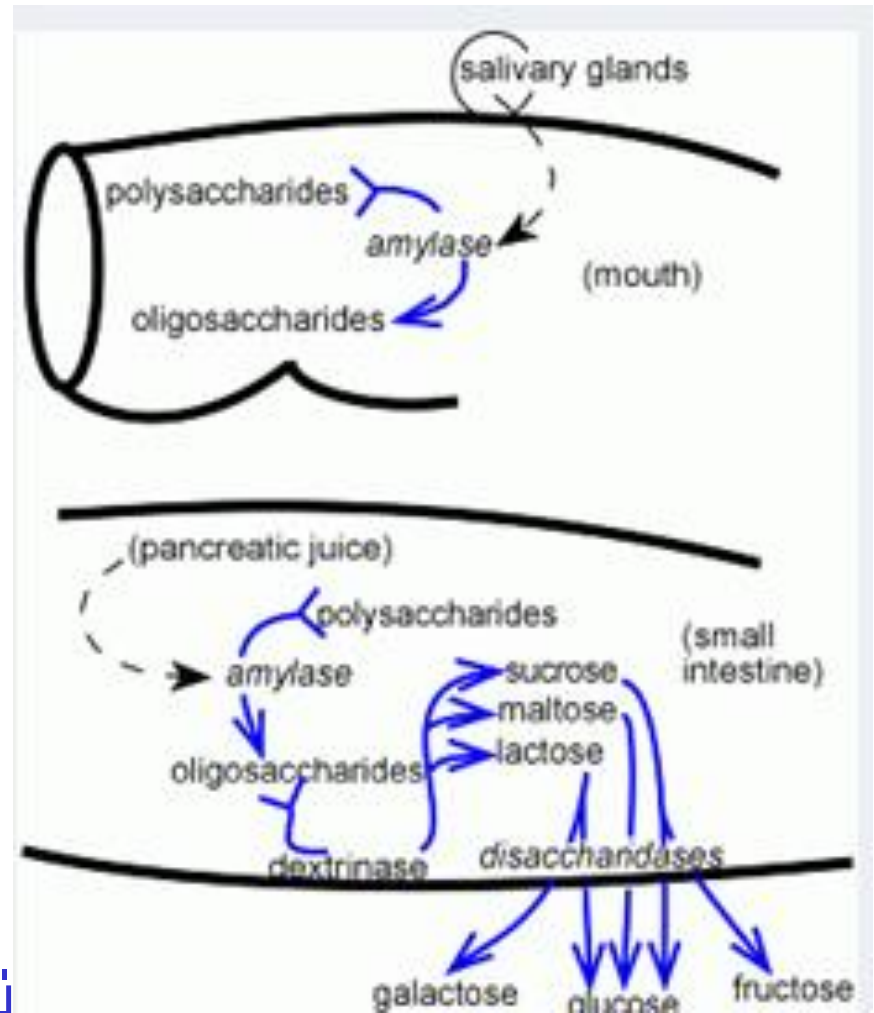
Maltase, lactase, sucrase

ย่อย maltose, lactose, sucrose

ได้ monosaccharide

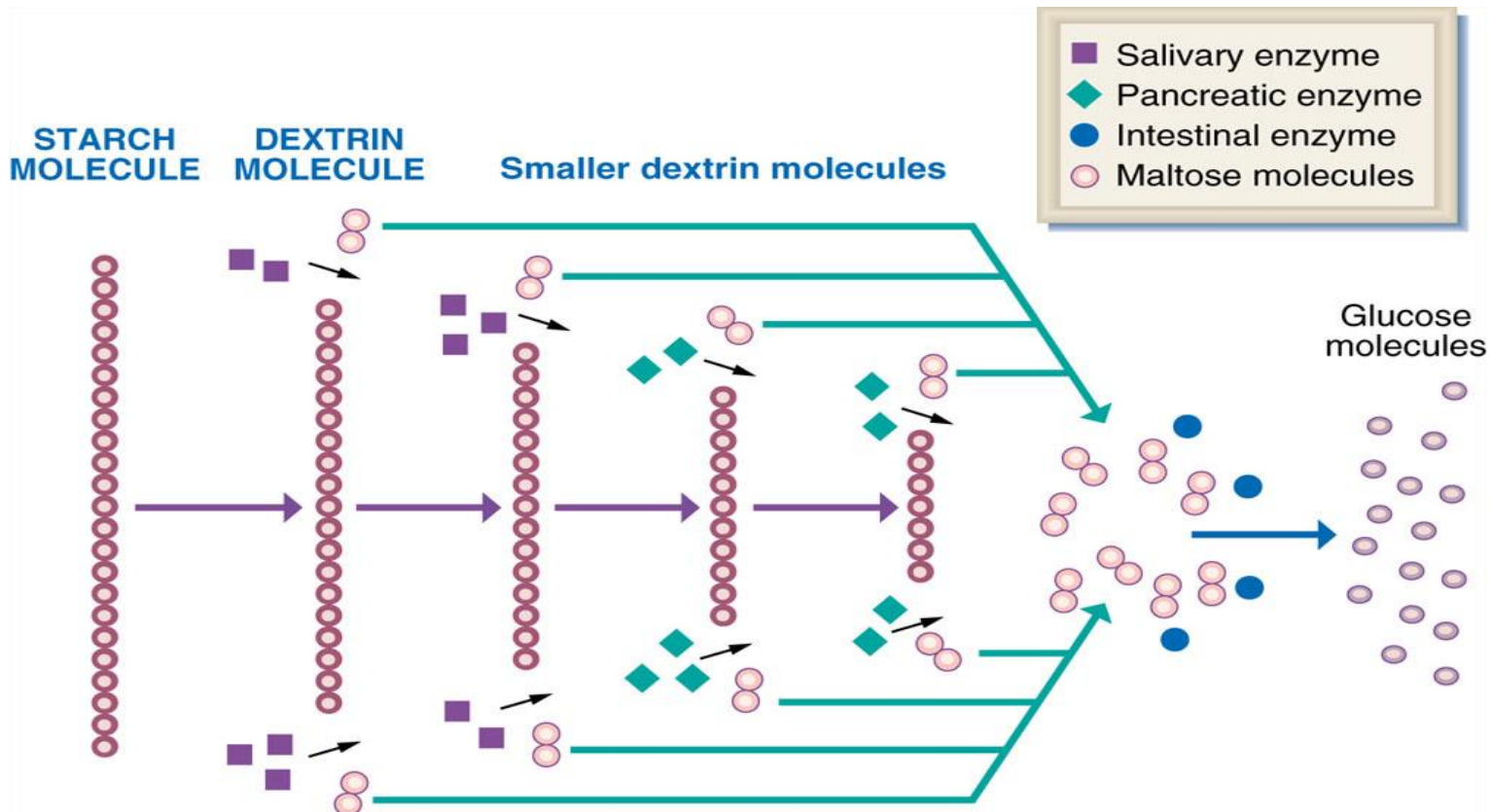
Lactose intolerance:

Lactase ลดลงเรื่อยๆ เมื่อโตเป็นผู้ใหญ่



เอนไซม์ย่อยคาร์โบไฮเดรต

ได้ oligosaccharide, dextrin, maltriose, maltose



Carbohydrates ที่ไม่ถูกย่อยใน small intestine
จะถูก bacterial flora ใน large intestine
สลายไม่ใช้ออกซิเจน โดย anaerobic

จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น

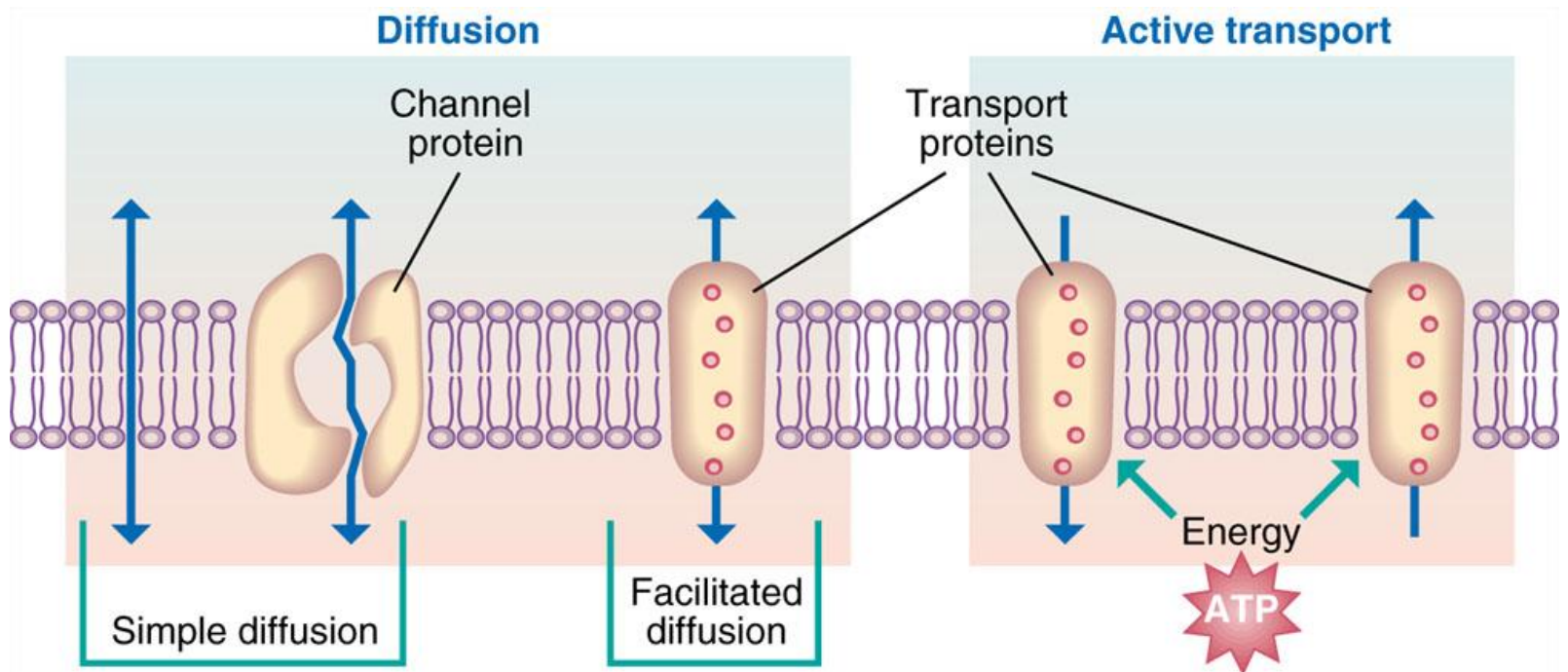
Gases: hydrogen
carbon dioxide
methane

Short-chain fatty acids:
acetate
propionate
butyrate

Absorption

ดูดซึมได้เฉพาะ **monosaccharides** เท่านั้น

1. Simple diffusion
2. Facillitated diffusion
3. Active transport (sodium dependent)



Fructose

Glucose, galactose

ตัวพาน้ำตาลในการดูดซึม

ตัวพาน้ำตาล:

1. Sodium dependent glucose transporter 1 (SGLT 1)

ตัวพา glucose, galactose จาก lumen เข้าสู่เซลล์ลำไส้ ไต
โดยวิธี active transport

2. Glucose transporter 1-14

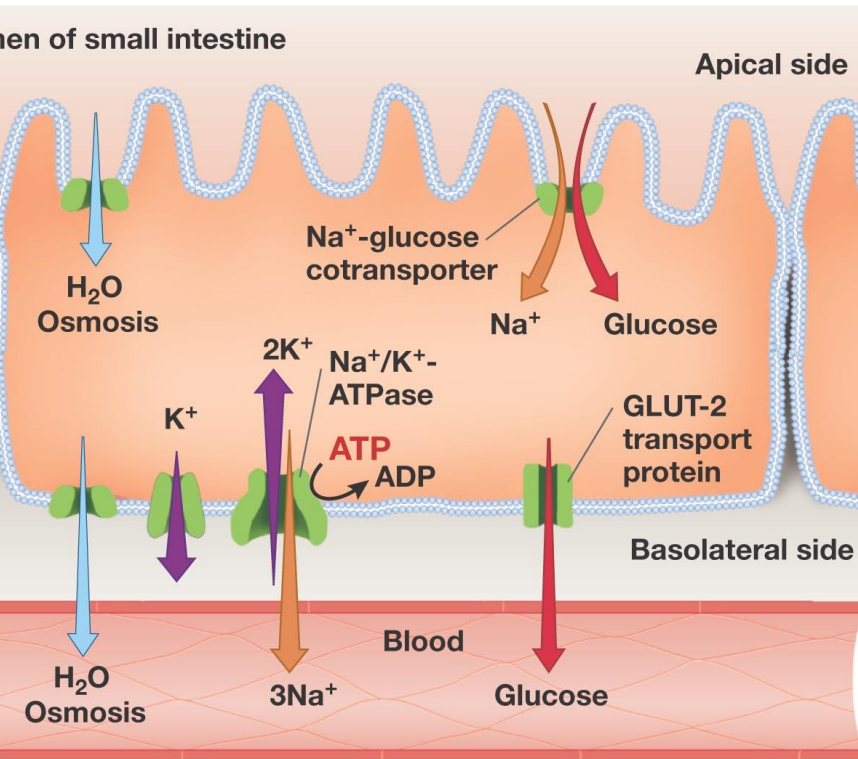
Glucose transporter 2 (GLUT 2)

พากลูโคสจากผนังลำไส้ด้าน basolateral เข้าสู่กระแสเลือด
โดยวิธี facilitated diffusion

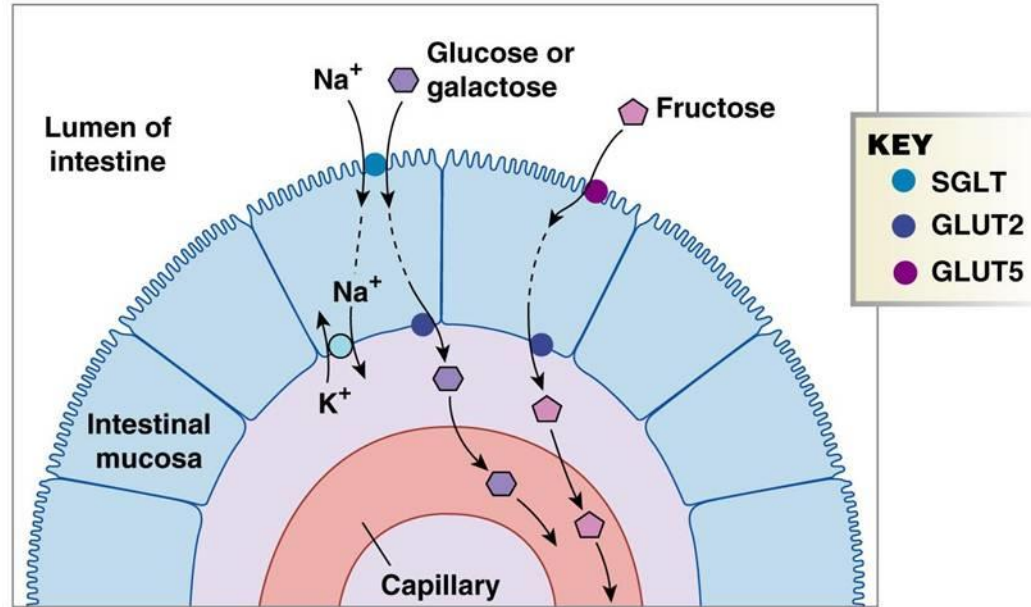
Glucose transporter 4 (GLUT 4)

ตัวพา glucose เข้าเซลล์กล้ามเนื้อ เซลล์ไขมันโดยอาศัย insulin

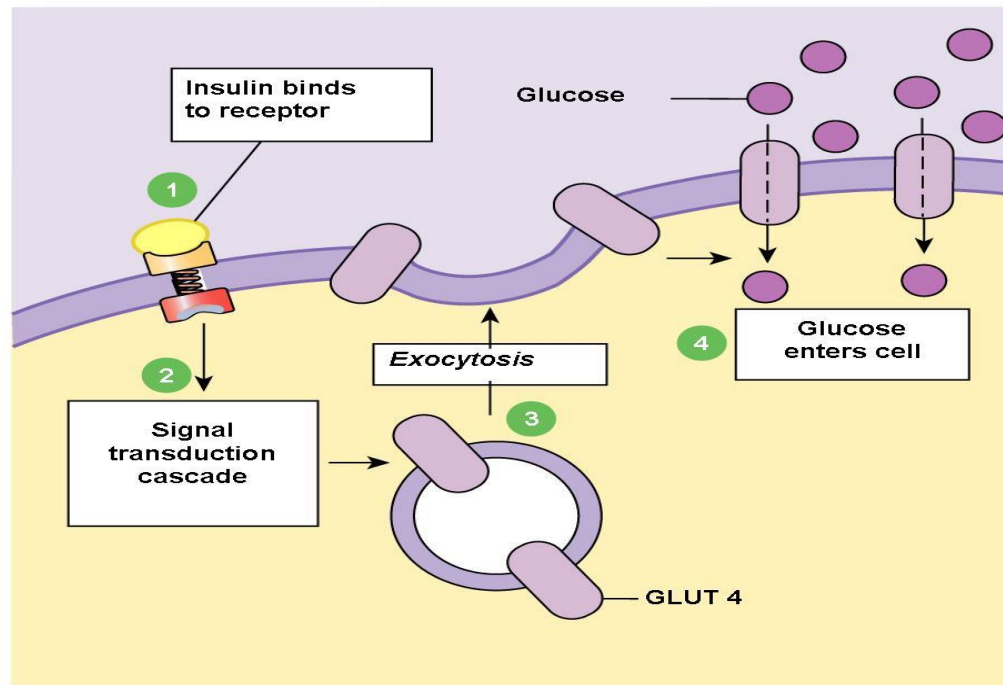
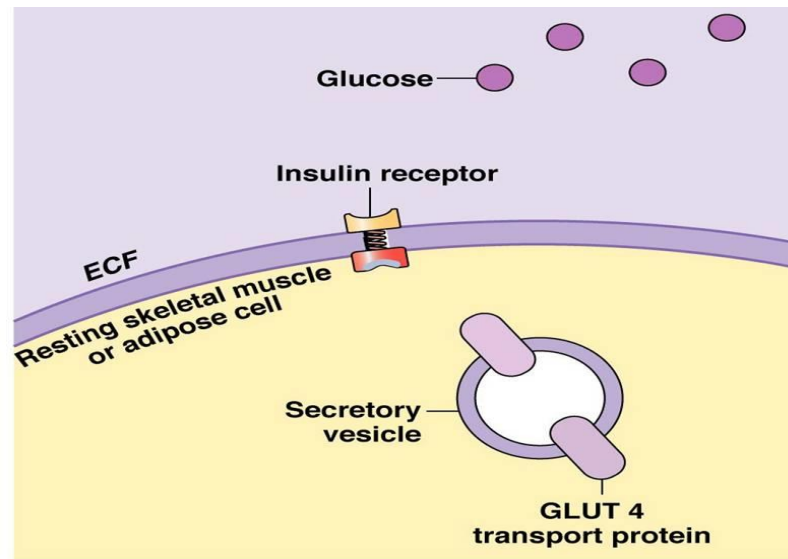
กลไกการดูดซึม



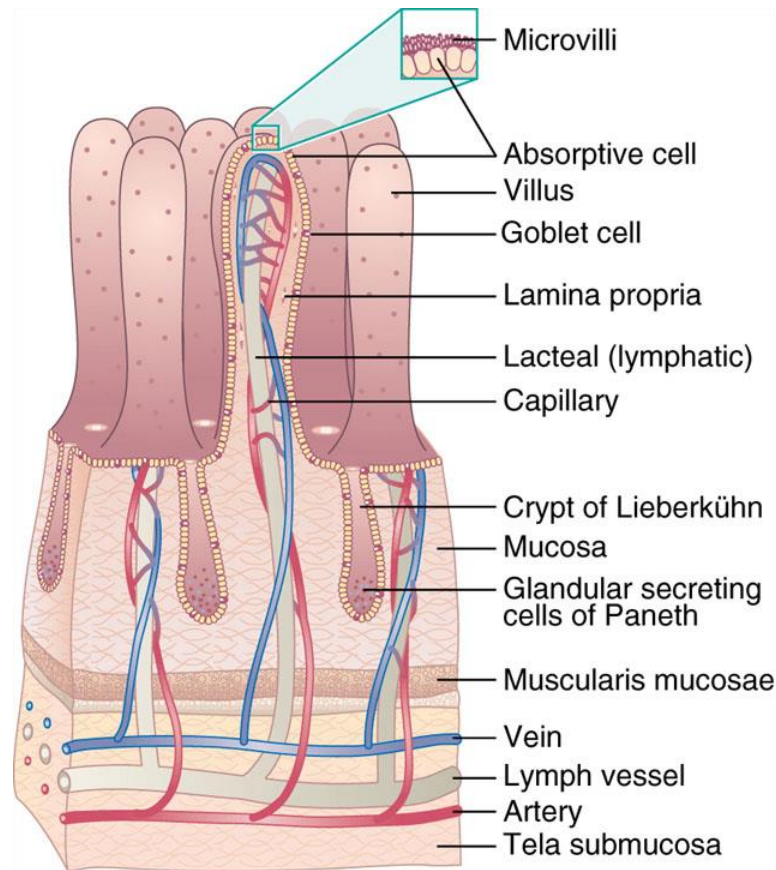
© Pearson Benjamin Cummings. All rights reserved.



Glucose enters the cell with Na⁺ on the SGLT symporter and exits on GLUT2. Fructose enters on GLUT5 and exits on GLUT 2.



น้ำตาลเมื่อถูกดูดซึมผ่านเซลล์ลำไส้
จะถูกนำเข้าสู่เส้นเลือดฝอยของลำไส้เล็ก
และถูกนำเข้าสู่ portal vein ต่อไป



การดูดซึมคาร์โบไฮเดรต

อัตราการดูดซึม

Galactose	1.1	active transport
Glucose	1.0	active transport
Fructose	0.4	facilitated diffusion
Manose	0.2	simple diffusion
Xylose	0.15	simple diffusion
Arabinose	0.1	simple diffusion

การย่อยโปรตีน

การย่อยโปรตีนเริ่มเกิดขึ้นใน

บริเวณกระเพาะอาหารประมาณ 10-20%

และย่อยเสร็จสมบูรณ์ในลำไส้เล็ก

ได้โมเลกุลเล็กลงและสามารถดูดซึมได้คือ

amino acid,

dipeptide,

tripeptide

เอนไซม์ย่อยโปรตีน

Pepsin

ถูกหลั่งออกมาในรูปของ **pepsinogen**
หลังจาก **chief cell** ที่กระเพาะอาหาร

Pepsinogen ถูกกระตุ้นให้ **active** โดย **HCl** ในกระเพาะอาหาร

Pepsin จะทำงานได้เหมาะสมที่ **pH 1-3**

จะถูก **denatured** ที่ **pH > 5**

และไม่ทำงานใน **duodenum** เมื่อมี **HCO₃⁻**

เอนไซม์ย่อยโปรตีน

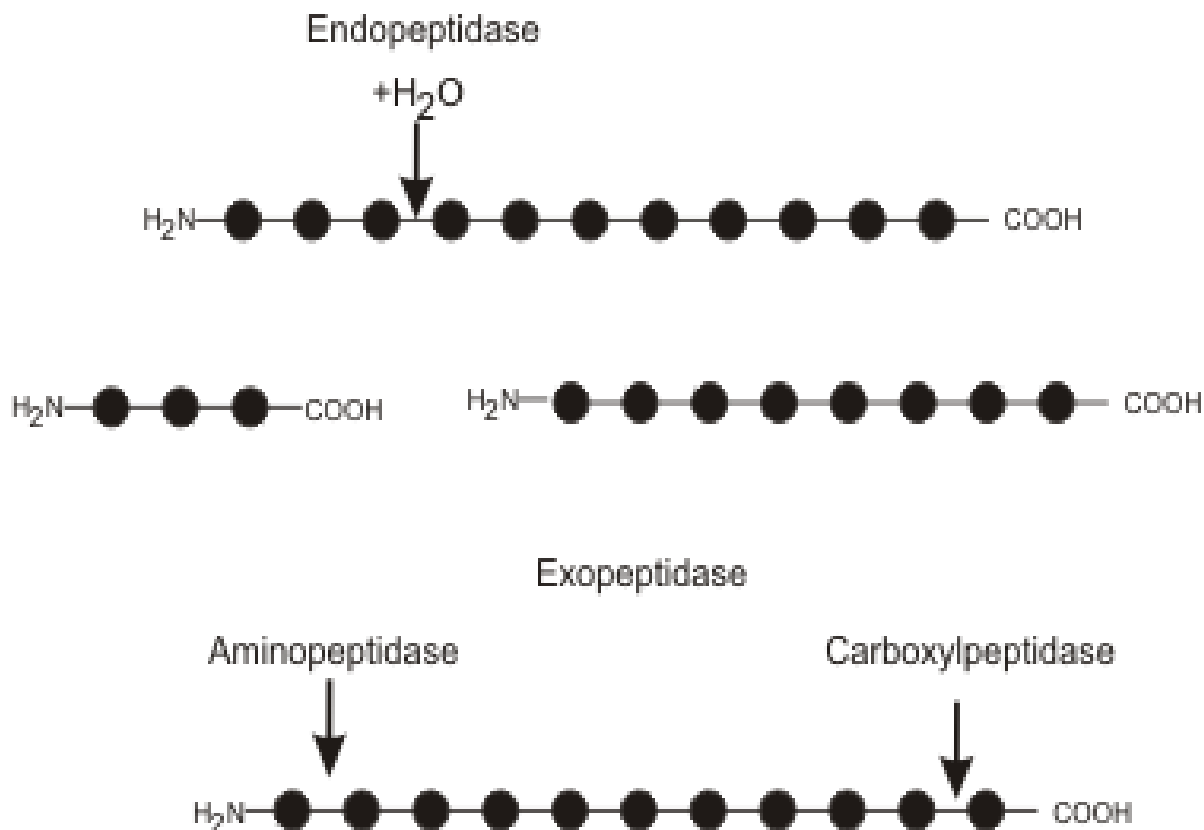
Endopeptidase: trypsin, chymotrypsin, elastase : หลังจากตัดอ่อน

ตัดพันธะ peptide ภายในสายของโปรตีน

ได้เป็น peptide ขนาดเล็ก

Exopeptidase: carboxypeptidase, aminopeptidase

ตัดพันธะ peptide บริเวณปลายสาย



การดูดซึมโปรตีน

การดูดซึมกรดอะมิโนเกิดขึ้นบริเวณ ลำไส้เล็กส่วนต้นและส่วนกลาง

การดูดซึมกรดอะมิโนจะเร็วกว่าการย่อยโปรตีน

จะไม่พบกรดอะมิโนหลงเหลืออยู่ในทางเดินอาหาร

การดูดซึมกรดอะมิโนอาศัยตัวพาด้านบนผนังเซลล์ลำไส้
ดูดซึมควบคู่กับ Na^+

(sodium dependent co-transporters)

แบบ **active transport**

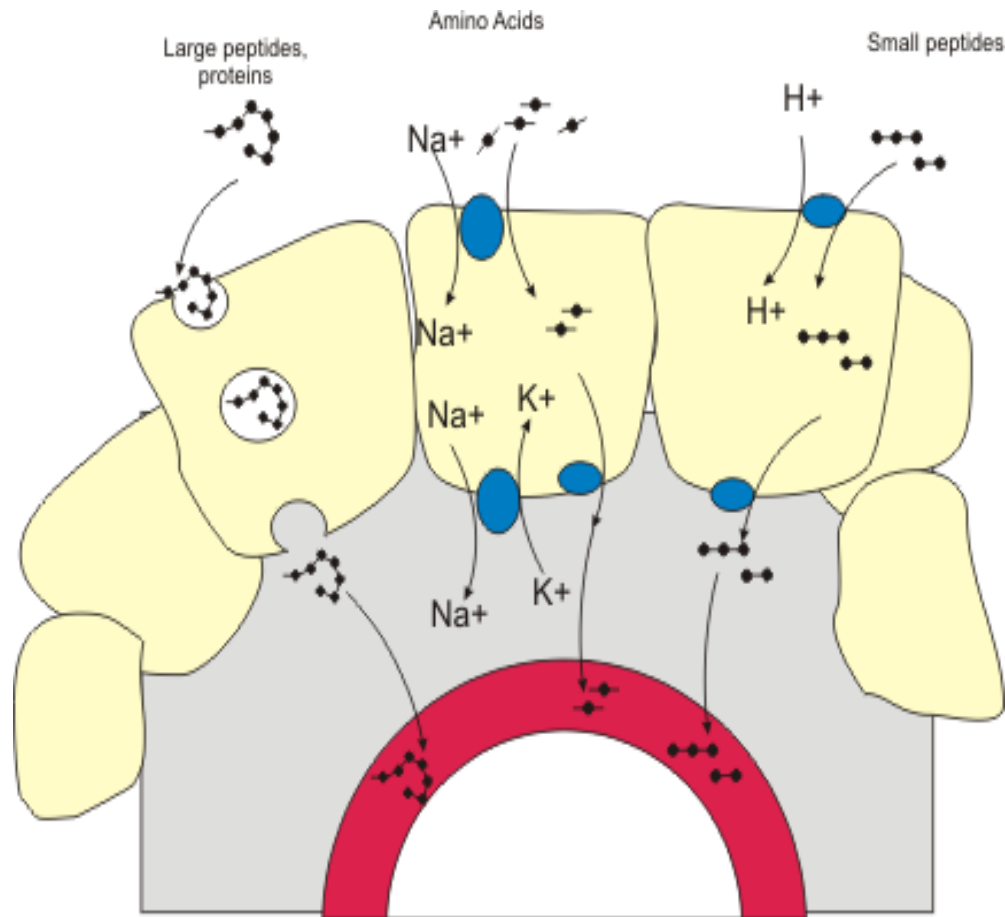
และออกจากเซลล์ลำไส้โดยตัวพาด้านข้างและด้านล่าง

(baso-lateral border)

โดยใช้ **co-transporters**

และ **facilitated transporters**

Di-peptides and tri-peptides ดูดซึมโดยใช้
 H^+ ion dependent co-transporter



การดูดซึมโปรตีน

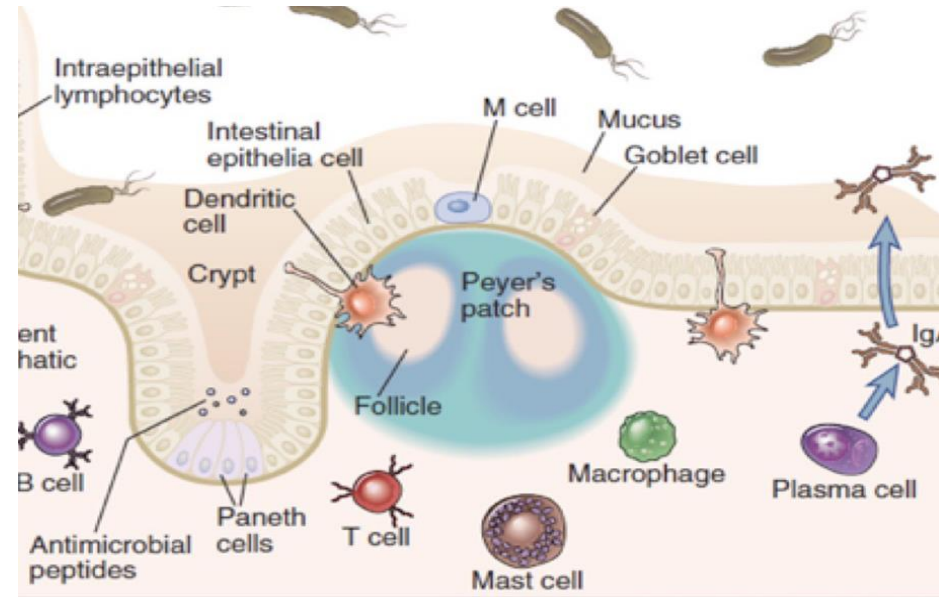
การดูดซึมโปรตีนในเด็กแรกเกิด

สามารถดูดซึมโปรตีนได้

การย่อยโปรตีนด้วยเอนไซม์ทำงานได้น้อย

การดูดซึมโปรตีนที่เป็นแอนติเจนเกิดบริเวณ **M cell**

ของลำไส้ ซึ่งปกคลุมกลุ่มเซลล์เม็ดเลือดขาว



เมื่อ **M cell** ดูดซึมแอนติเจนเข้าไป

จะกระตุ้น **lymphoblast** ให้หลั่ง **IgA**

เพื่อเป็นภูมิคุ้มกันเมื่อได้รับเชื้อโรคเข้าสู่ร่างกายอีกครั้ง

ความสามารถในการดูดซึมโมเลกุลโปรตีนจะลดลงตามอายุ

การนำส่งกรดอะมิโน

กรดอะมิโนเมื่อถูกดูดซึมผ่านเซลล์ลำไส้
จะถูกนำเข้าสู่เส้นเลือดฝอยของลำไส้เล็ก
และถูกนำเข้าสู่ portal vein ต่อไป

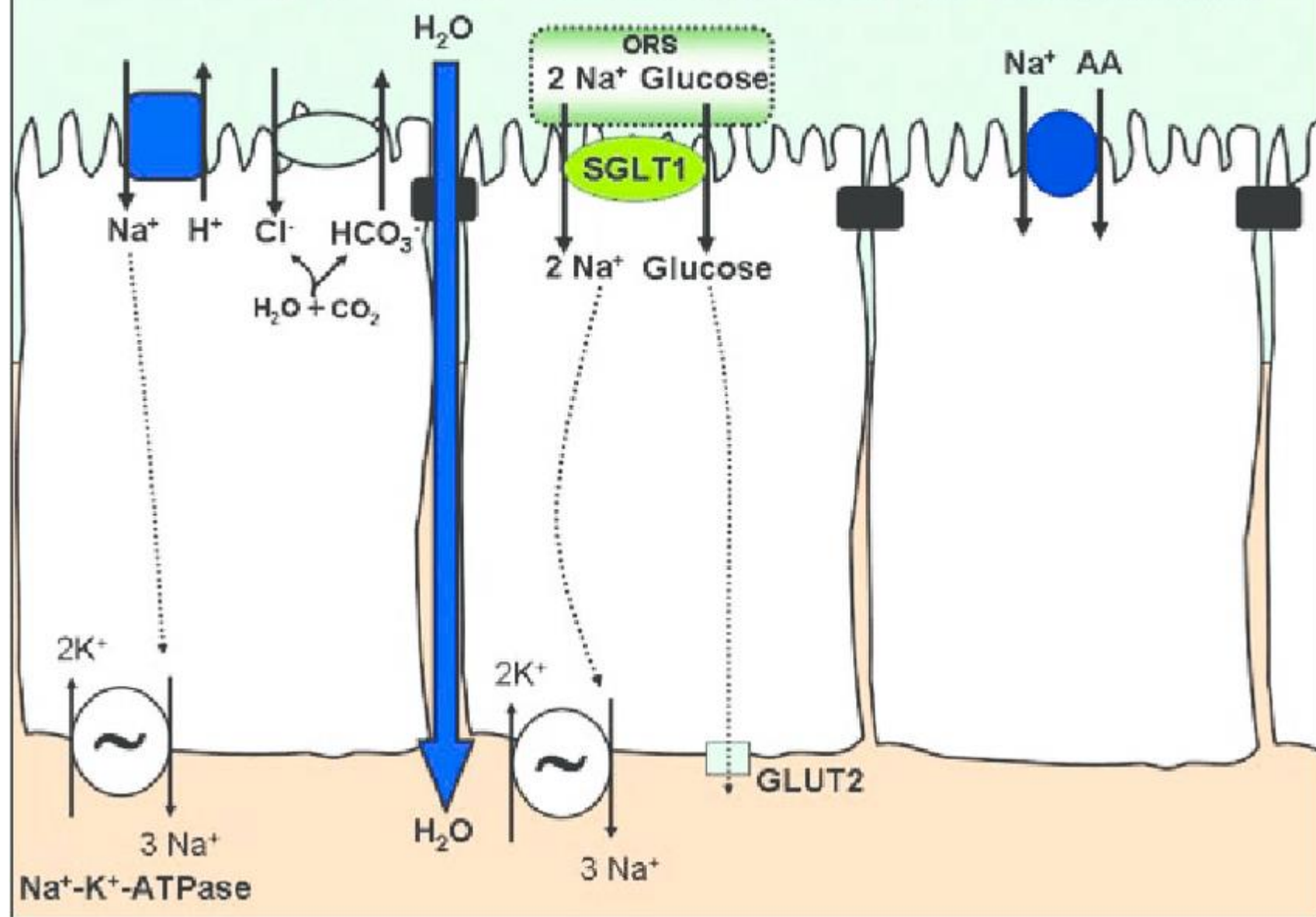
กรดอะมิโนจะถูกนำไปใช้

สังเคราะห์โปรตีนและเอนไซม์

สังเคราะห์โปรตีนที่หลังเข้าสู่กระแสเลือด เช่น albumin, globulin

สังเคราะห์ฮอร์โมนเพื่อควบคุมการทำงานของอวัยวะต่างๆ

Na⁺/H⁺ exchange (NHE) Na⁺-Glucose Cotransport Na⁺-AA Cotransport



การย่อยและดูดซึมลิพิด

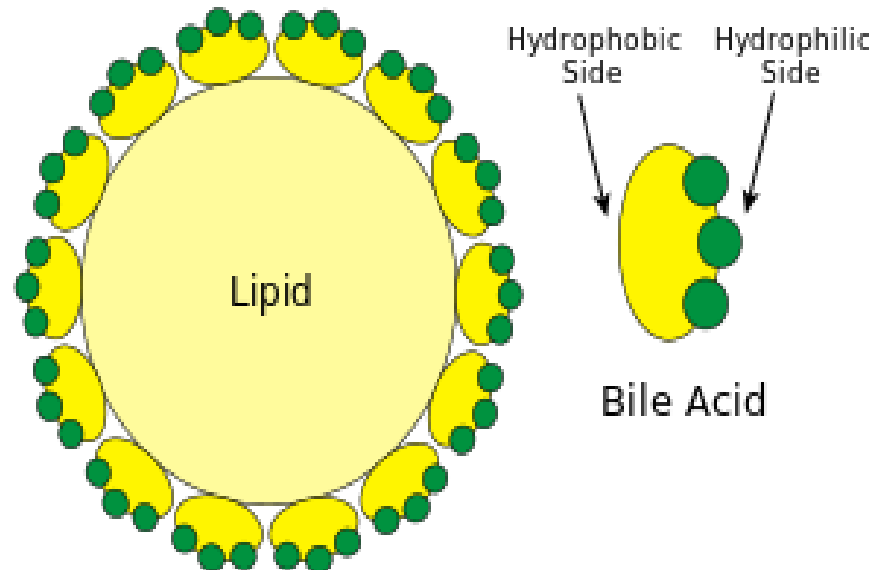
ลิพิดในอาหารประกอบด้วย Triacylglycerol > 90%
Cholesterol
Phospholipid

-ปากและกระเพาะมีการย่อยไขมันได้เล็กน้อย
โดยเอนไซม์ **lipase** จากน้ำลายและกระเพาะ

-ลำไส้เล็ก

การย่อยที่ลำไส้ต้องอาศัย **emulsification** โดยน้ำดี

องค์ประกอบของน้ำดีมีโมเลกุลมีขั้ว
ไปล้อมรอบ fat ให้มีขนาดเล็กๆ
เกิดเป็น **emulsion**
อยู่ใน **aqueous phase**
ทำให้ **lipase** เข้าสลายได้



การย่อยและดูดซึมลิพิด

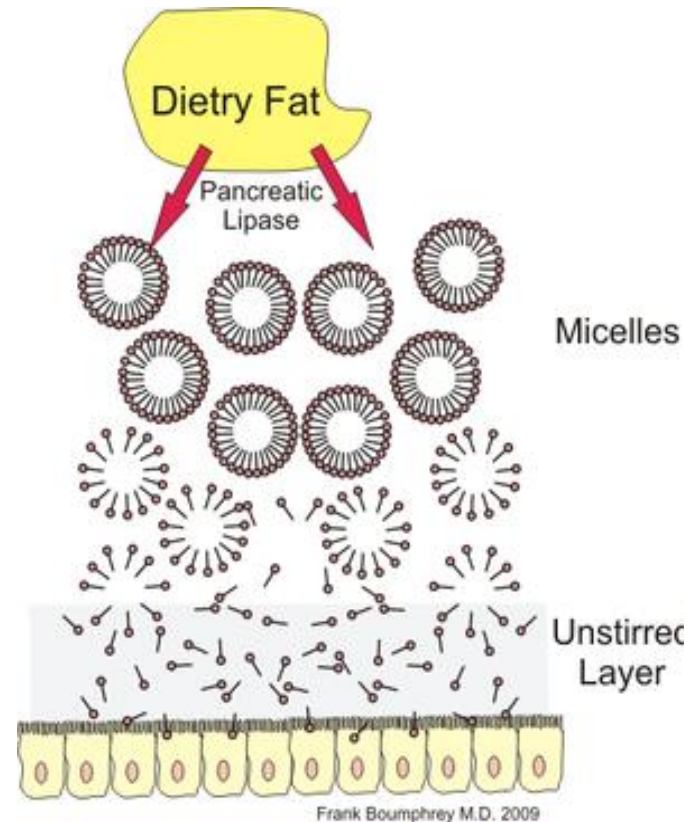
-ลำไส้เล็ก

lipase จากตับอ่อน ย่อย TAG
esterase ย่อย cholesteryl esterase
phospholipase ย่อย phospholipid

-ผลผลิตที่ได้ TAG $\rightarrow$ FFA + 2-MAG (ย่อยตรงตำแหน่ง 1,3)

ลิพิดที่ผ่านกระบวนการย่อยแล้วประกอบด้วย

Free fatty acid Monoacylglycerol
Cholesterol Cholesteryl ester
Phospholipid Fat soluble vitamins



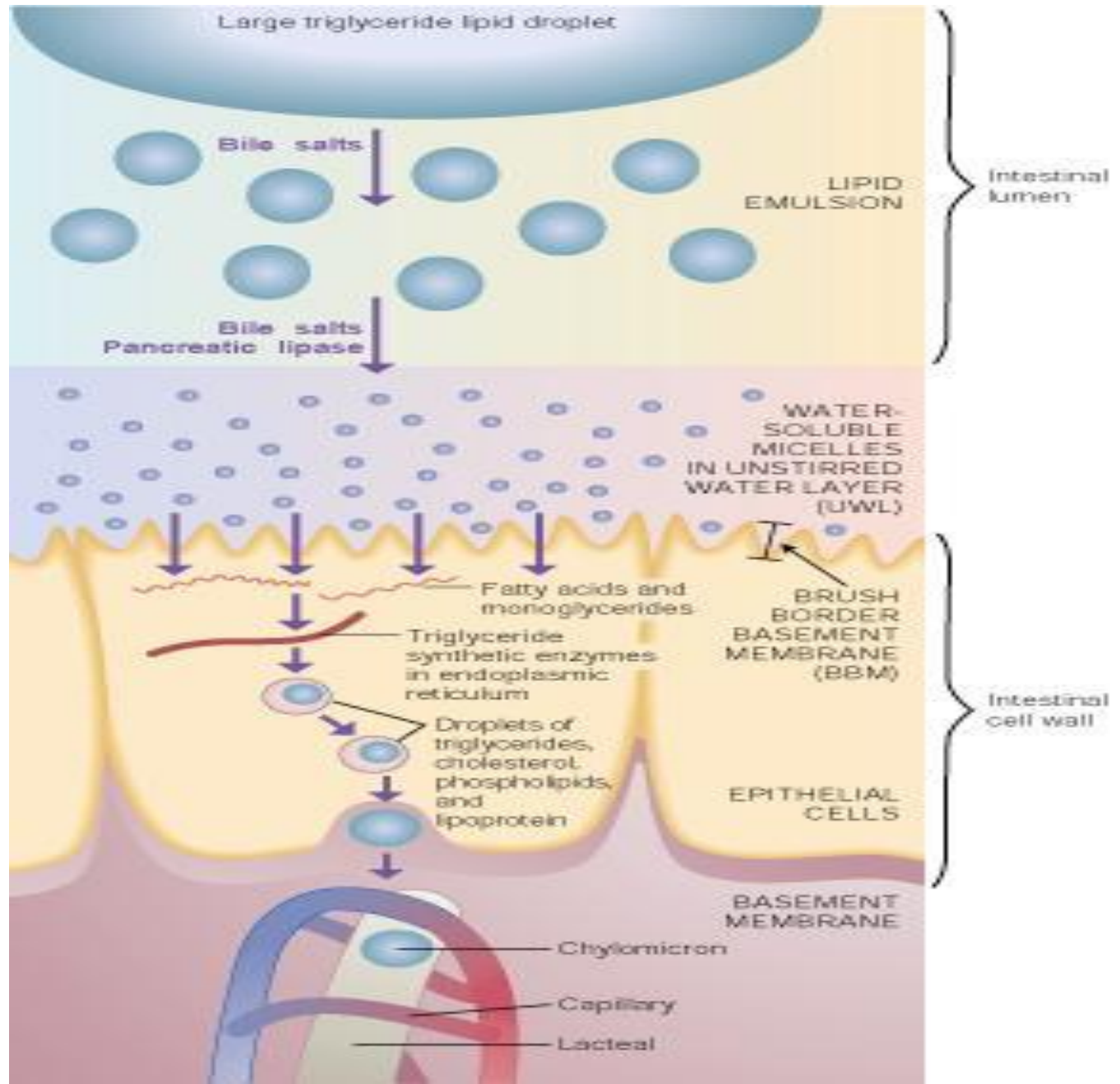
ลิพิดเหล่านี้จะรวมตัวกันกับ **bile salt** อยู่ในรูป **mixed micelles**
เพื่อให้สามารถนำส่งมายังเซลล์ผนังลำไส้และถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ลำไส้ต่อไป

ลิพิดเหล่านี้จะถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ผนังลำไส้และเข้าสู่หลอดน้ำเหลืองและเส้นเลือดดำต่อไป

การย่อยดูดซึมขนส่งลิพิด

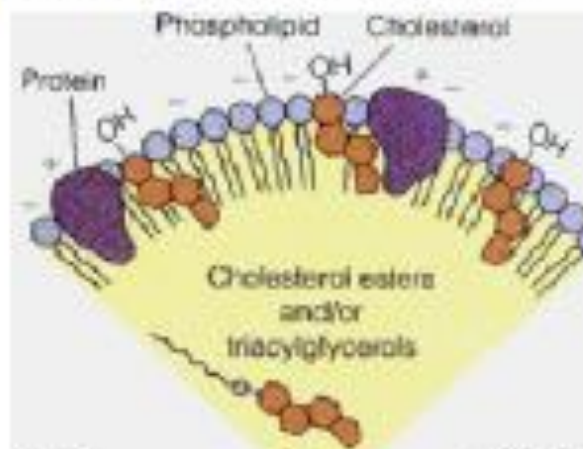
1. การย่อย TAG เป็น Free fatty acid + Monoacylglycerol ในลำไส้ โดย pancreatic lipase
2. Free fatty acid + Monoacylglycerol ไปสู่ผนังเซลล์เยื่อบุโดยเกลือน้ำดี ซึ่งอยู่ในรูป micelle
3. การดูดซึม Free fatty acid + Monoacylglycerol โดยเซลล์เยื่อบุ และการสังเคราะห์ TAG ใหม่ในเซลล์เยื่อบุลำไส้
4. TAG จะถูกล้อมรอบด้วยโปรตีนและ lipid ชนิดอื่นๆ เป็น chylomicron
5. การ chylomicron ออกจากเซลล์เข้าสู่ท่อน้ำเหลือง

Fat digestion, absorption, transportation

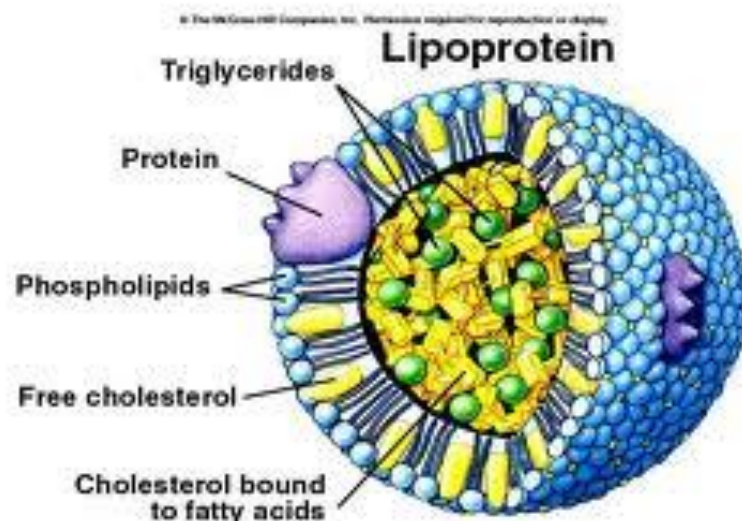


การขนส่งลิพิด

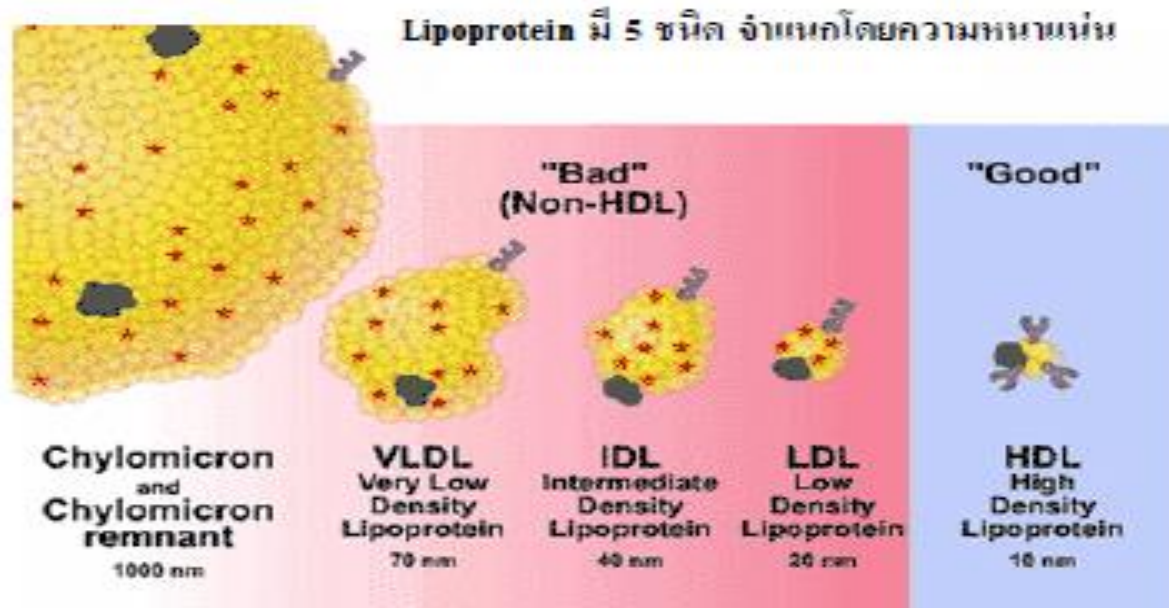
Lipoprotein: กลุ่มก้อนของลิพิดและโปรตีนที่ละลายน้ำได้
ประกอบด้วย lipid และ protein รวมกันเป็นทรงกลม
ข้างในทรงกลมประกอบด้วย lipid ไม่ละลายน้ำ เช่น TG, CE
ล้อมรอบด้วย amphipathic lipid และ apoprotein



- บทบาทหน้าที่
ช่วยในการขนส่ง lipid ไปในกระแสเลือด และนำไปสู่



Classification of lipoproteins



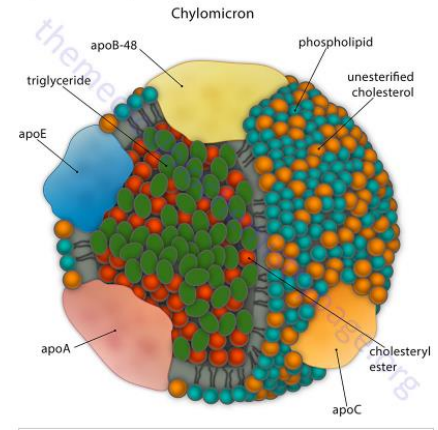
	Chylo-micron	VLDL	IDL	LDL	HDL
Density (g/mL)	<0.95	0.950– 1.006	1.006– 1.019	1.019– 1.063	1.063– 1.210
Components (% dry weight)					
Protein	2	8	15	22	40–55
Triacylglycerol	86	55	31	6	4
Free cholesterol	2	7	7	8	4
Cholesterol esters	3	12	23	42	12–20
Phospholipids	7	18	22	22	25–30
Apoprotein composition	A-I, A-II, B-48, C-I, C-II, C-III	B-100, C-I, C-II, C-III, E	B-100, C-I, C-II, C-III, E	B-100	A-I, A-II, C-I, C-II, C-III, D, E

Chylomicron

- สังเคราะห์ขึ้นใน intestinal mucosal cell

ลิพิดจากอาหารที่ดูดซึมเข้าไป **dietary fatty acid**
และ **glycerol**

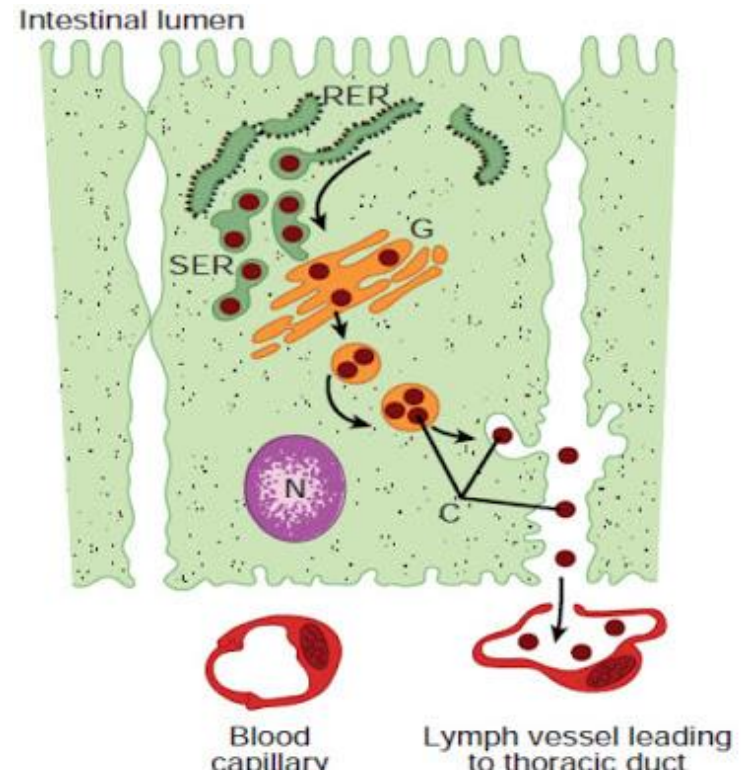
สังเคราะห์เป็น **triacylglycerol** ร่วมกับ **lipid** อื่น และ
apolipoproteins ชนิด **apoB48**, **apoA**
ประกอบขึ้นเป็น **nascent chylomicron**



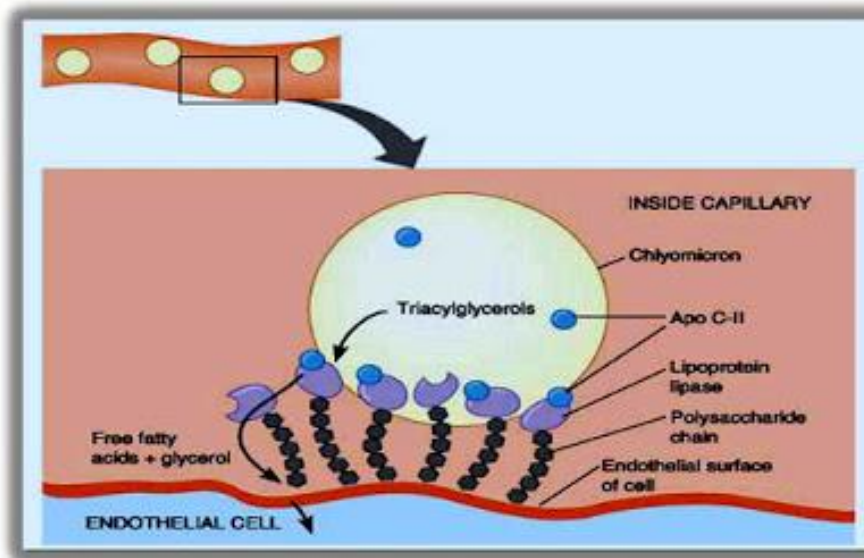
หลังเข้าสู่ **lymph vessel** → **thoracic duct**
แล้วเข้าสู่ **venous circulation**

มีการแลกเปลี่ยน **apolipoprotein** กับ **HDL**
ทำให้ **chylomicron** มี

apoB48, **apoA**, **apoC**, **apoE** เป็นองค์ประกอบ
ระยะนี้เรียกว่า **mature chylomicron**



- ทำหน้าที่ในการขนส่ง exogenous lipids (dietary lipids) ไปยัง peripheral tissue

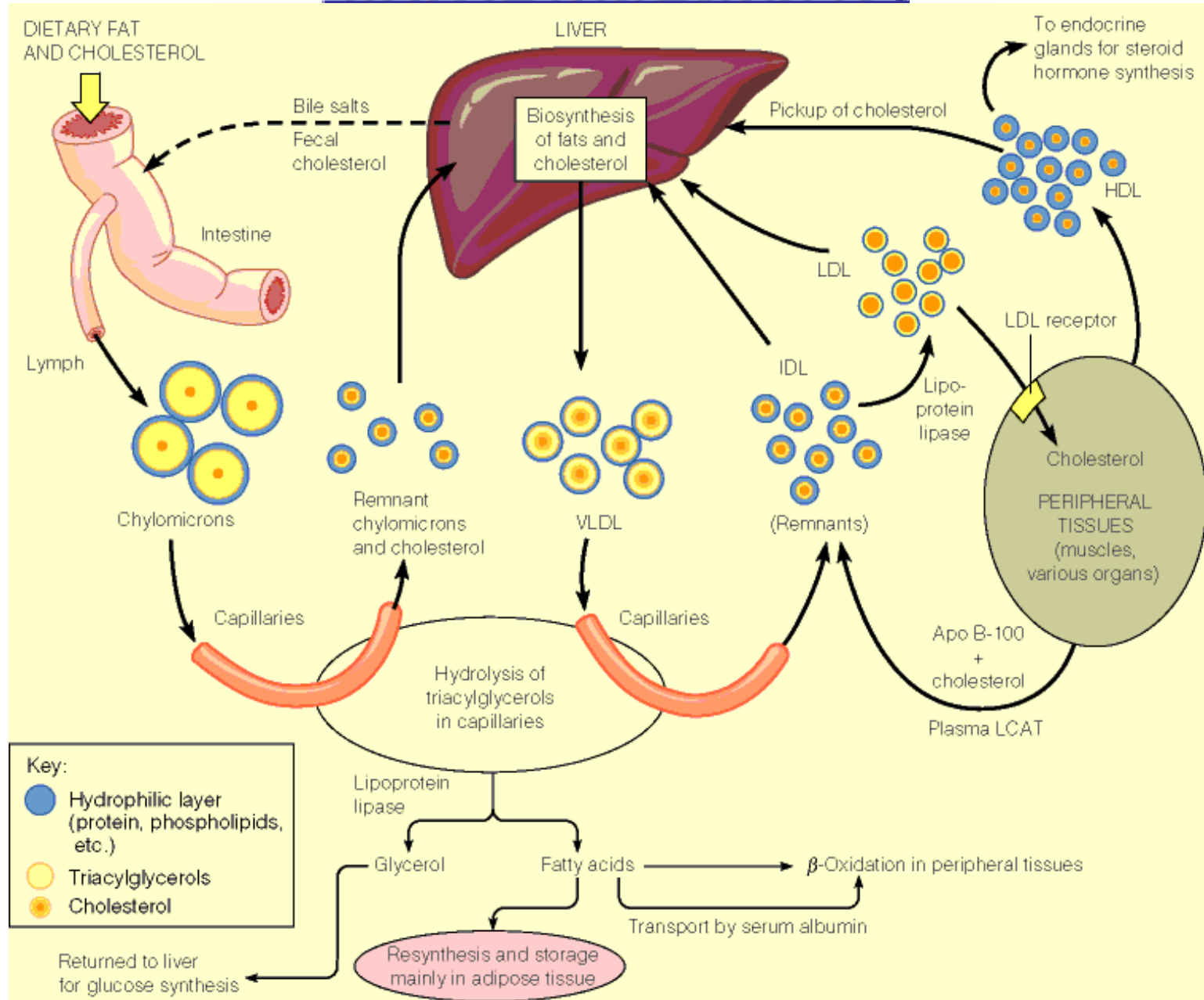


ApoCII ใน chylomicron จะกระตุ้นการทำงานของ lipoprotein lipase

- Lipoprotein lipase** : เป็นเอนไซม์ที่ผนังของหลอดเลือดฝอย ทำหน้าที่ย่อย TAG ที่อยู่ใน chylomicron และ VLDL ได้ fatty acid และ glycerol

- Chylomicron ที่เหลือเรียก chylomicron remnant จะถูกสลายโดยจับกับ Chylomicron remnant receptor ที่เซลล์ตับ

ไลโปโปรตีนชนิดต่างๆ



VLDL

- สังเคราะห์ขึ้นโดยตับ ประกอบด้วย TAG เป็นส่วนใหญ่ทำหน้าที่ขนส่ง endogenous lipid ไป peripheral tissue

เซลล์ตับจะนำลิพิดต่างๆ TAG, cholesterol, cholesterol ester, phospholipid และ apoB-100 มาสังเคราะห์เป็น lipoprotein VLDL หลังเข้าสู่กระแสเลือด

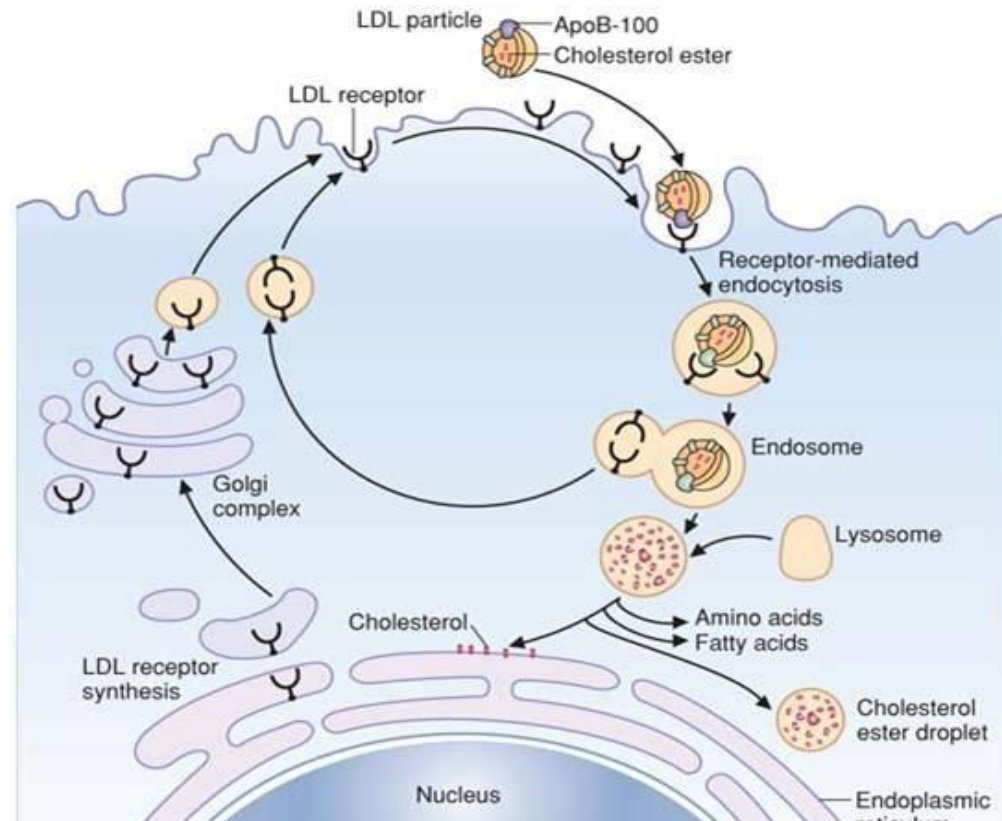
ที่หลอดเลือดฝอย apoCII ใน VLDL จะกระตุ้นการทำงานของ lipoprotein lipase ให้สลาย TAG เป็น fatty acid และ glycerol

VLDL จะมีขนาดเล็กลงและมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น กลายเป็น IDL และ LDL

VLDL จึงมีหน้าที่นำลิพิดจากตับไปให้เซลล์ต่างๆ

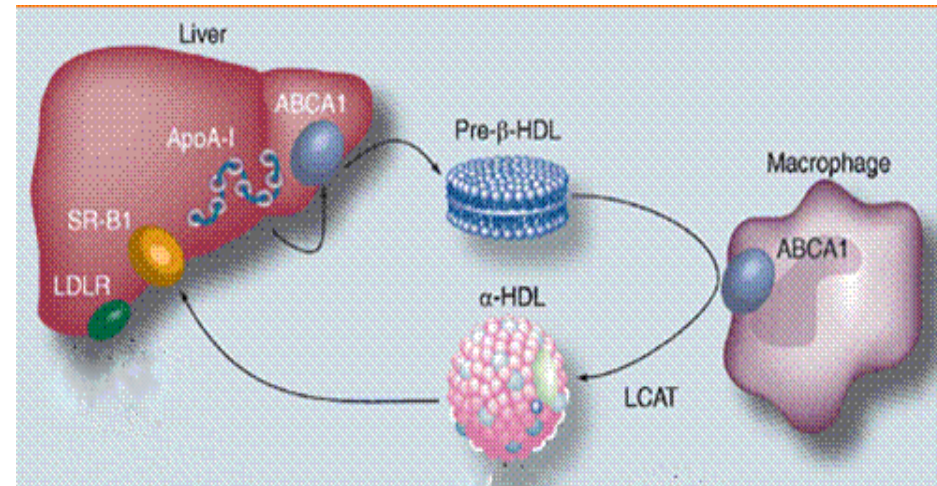
LDL

- ประกอบด้วย cholesterol เป็นส่วนใหญ่ ทำหน้าที่ในการขนส่ง cholesterol ไปยัง peripheral tissue
- LDL จับกับ LDL receptor ของเซลล์ต่างๆ ที่มี receptor ต่อ ApoB-100 แล้วถูก endocytosis เข้าไป และถูกย่อยสลายโดย lysosome lipase
- Cholesterol ถูกเซลล์นำไปใช้โดยสังเคราะห์เป็น membrane steroid hormone bile salts



HDL

- สังเคราะห์ที่ตับและลำไส้ ทำหน้าที่ขนส่ง cholesterol จาก extrahepatic tissue กลับเข้าสู่ตับ

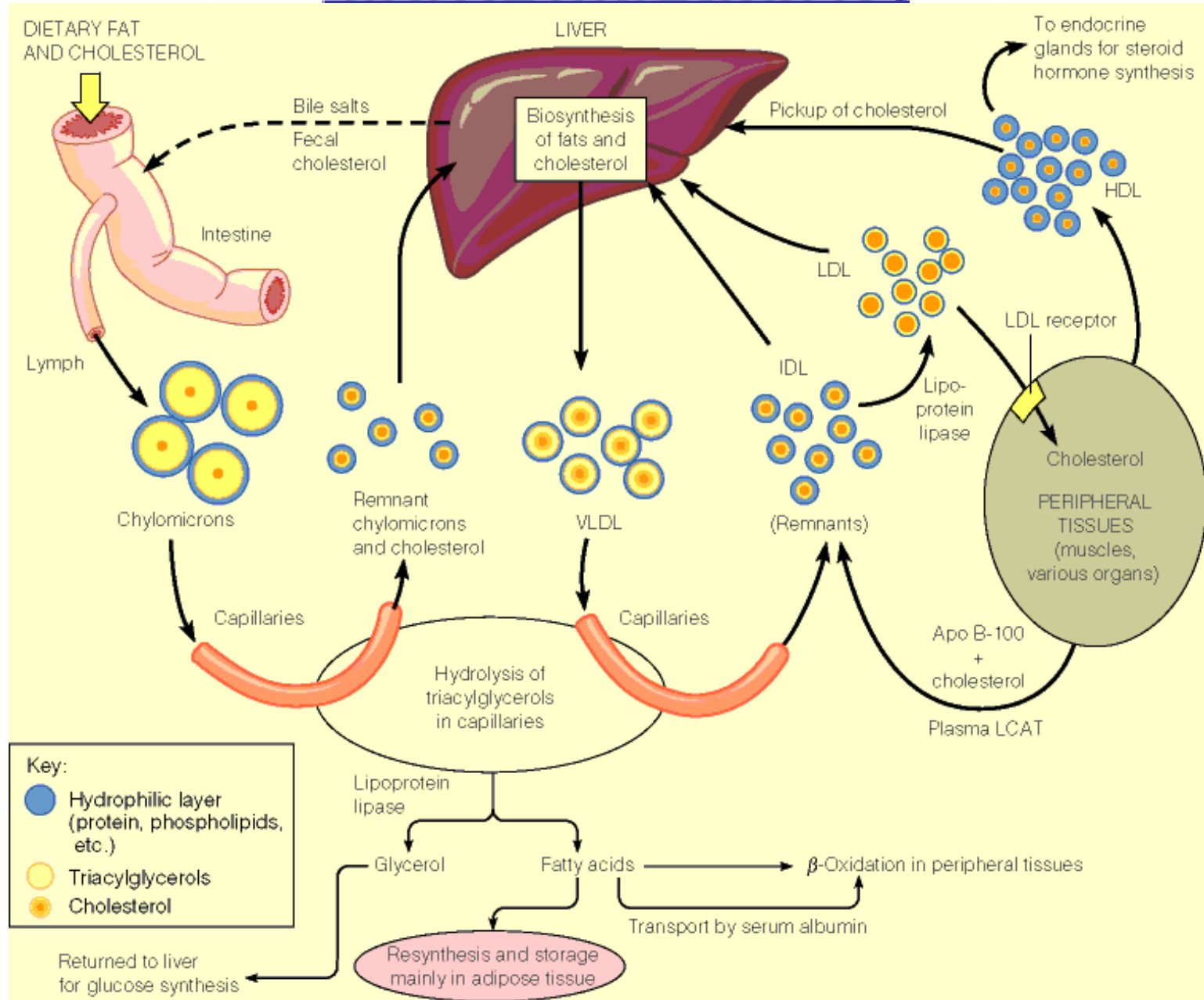


HDL ประกอบด้วย **apoA-1 apoC apoE**

-**Cholesteryl ester** จะถูกเก็บสะสมอยู่ภายใน **HDL**
ทำให้ **HDL** เปลี่ยนรูปจาก **discoidal** เป็น **spherical**

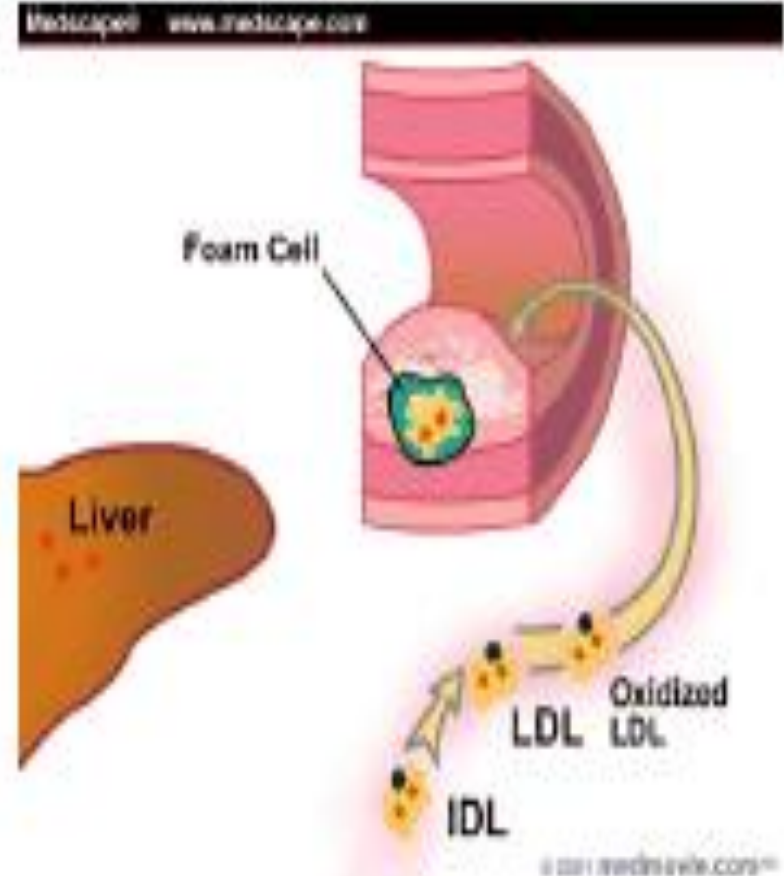
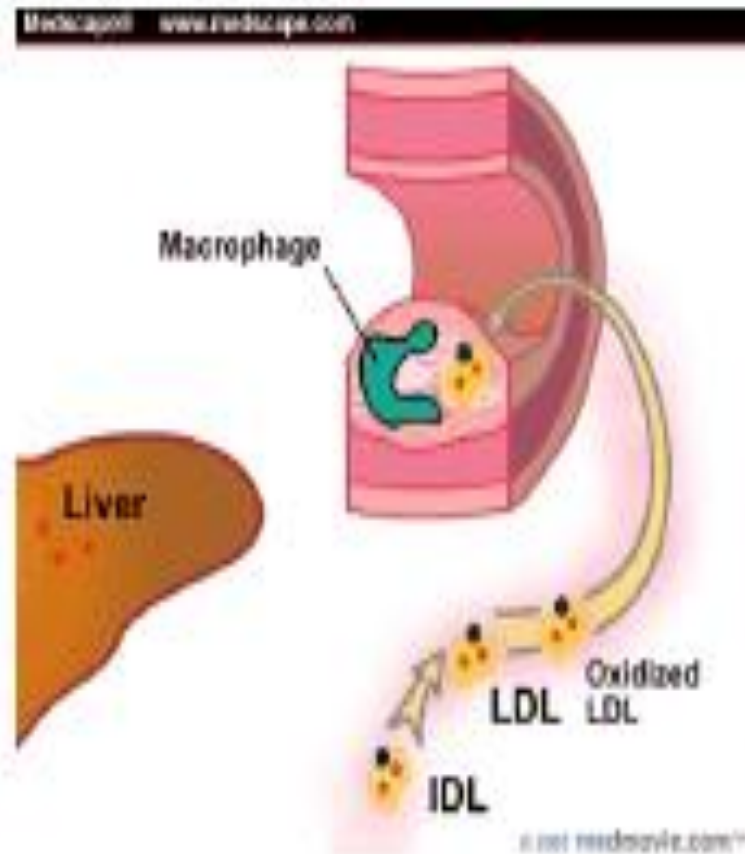
- Cholesterol ใน HDL จะถูกสังเคราะห์เป็น Cholesterol ester โดย **LCAT** (lecithin-cholesterol acyl transferase)

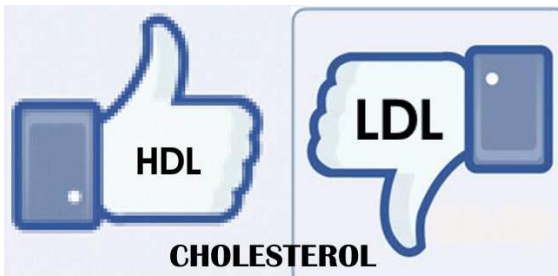
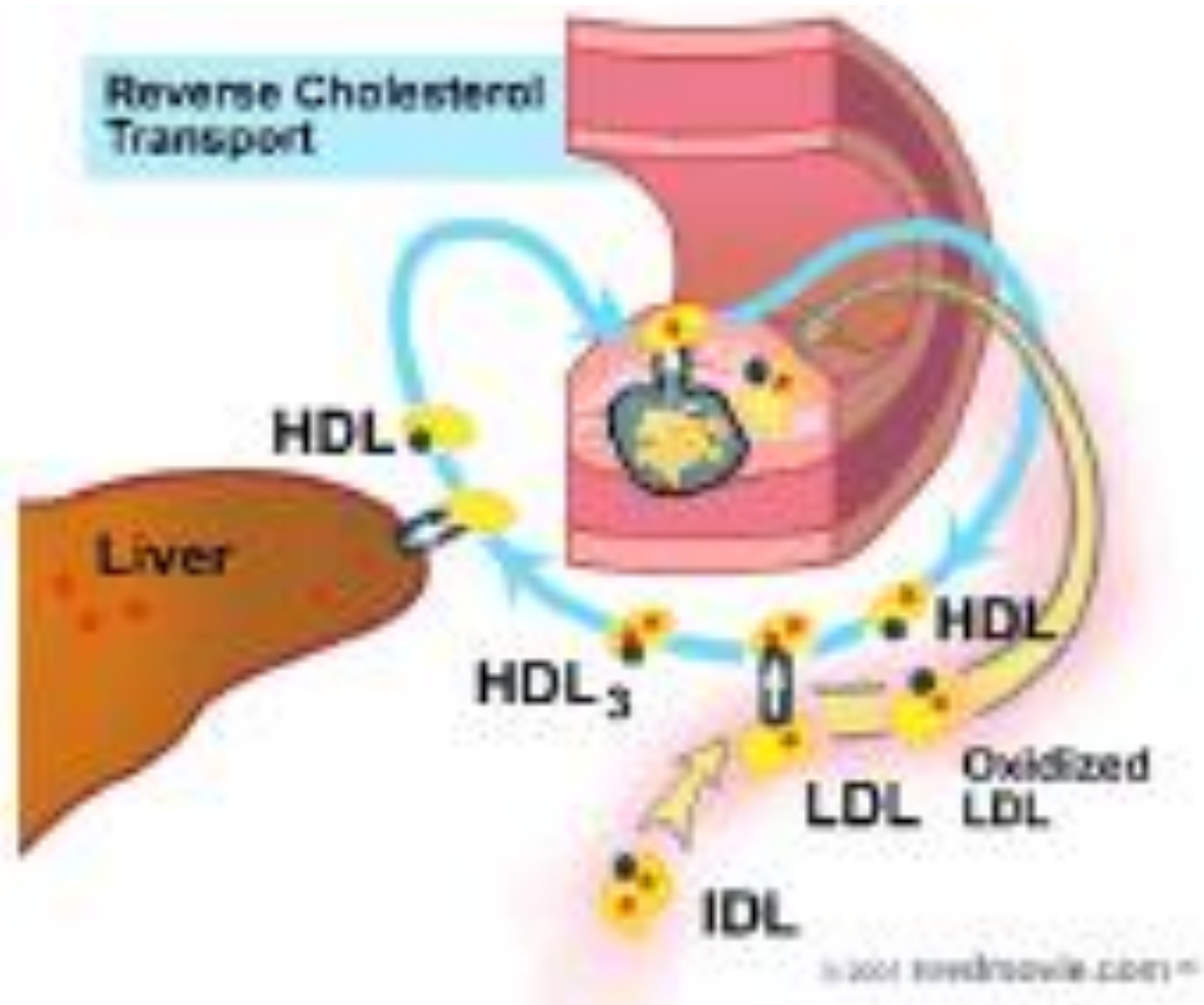
ไลโปโปรตีนชนิดต่างๆ



Atherosclerosis

- คือ การสะสมของไขมันที่ผนังหลอดเลือด ทำให้เกิดหลอดเลือดแข็งตัว





TAG ที่เก็บสะสมในเซลล์ไขมัน (adipocytes)

ถูกสลายโดย hormone sensitive lipase

ได้ fatty acid และ glycerol

fatty acid จะถูกปล่อยเข้าสู่กระแสเลือด

โดยจับกับ albumin เป็น

albumin free fatty acid complex

-Water soluble vitamin

Cobalamin (vitamin B12)

ต้องจับกับ intrinsic factor ซึ่งสังเคราะห์โดยกระเพาะอาหาร
เพื่อนำมาดูดซึมที่ลำไส้เล็กบริเวณ ileum

-Mineral

มีฮอร์โมนหลายชนิดเกี่ยวข้องกับการกระตุ้นลำไส้เล็ก
เพื่อควบคุมการดูดซึม **Ca Na K I Fe Mg**