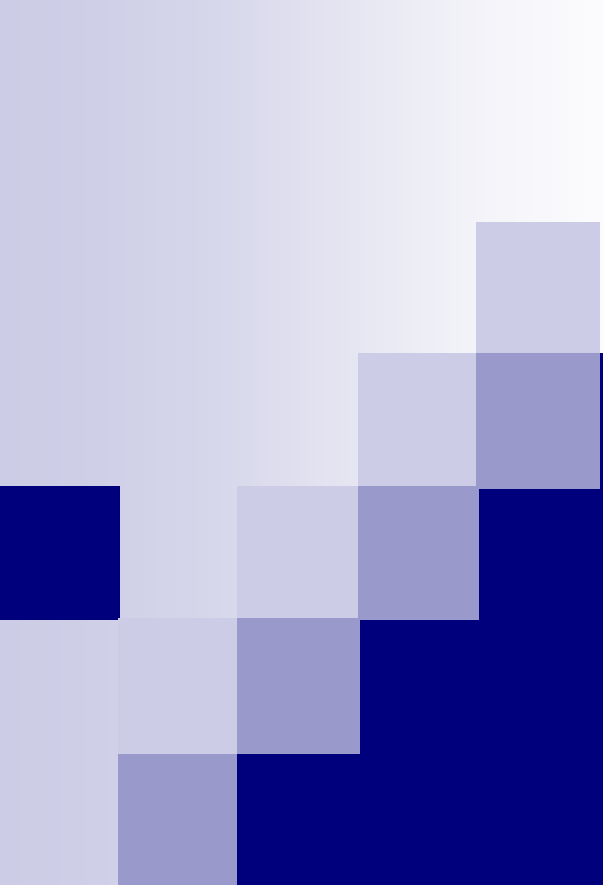




สมดุลน้ำและเกลือแร่: ไต และการสร้างปัสสาวะ

สุภร กตเวทิน



ระบบขับถ่ายปัสสาวะ

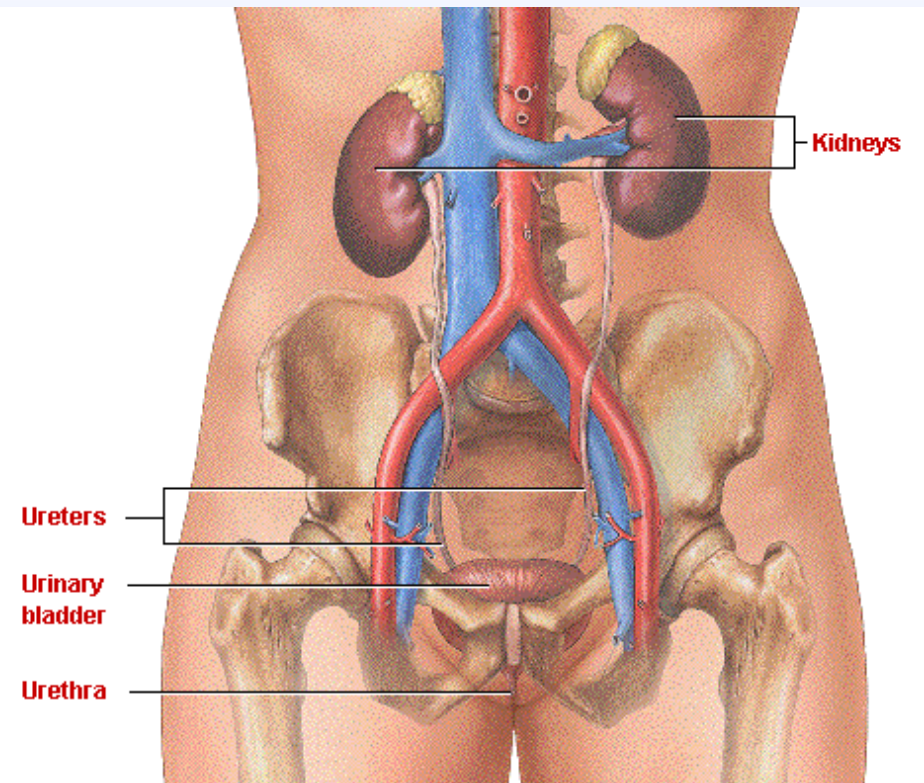
Urinary System

- VCD title “Adam’s story on urinary system”

THE URINARY SYSTEM

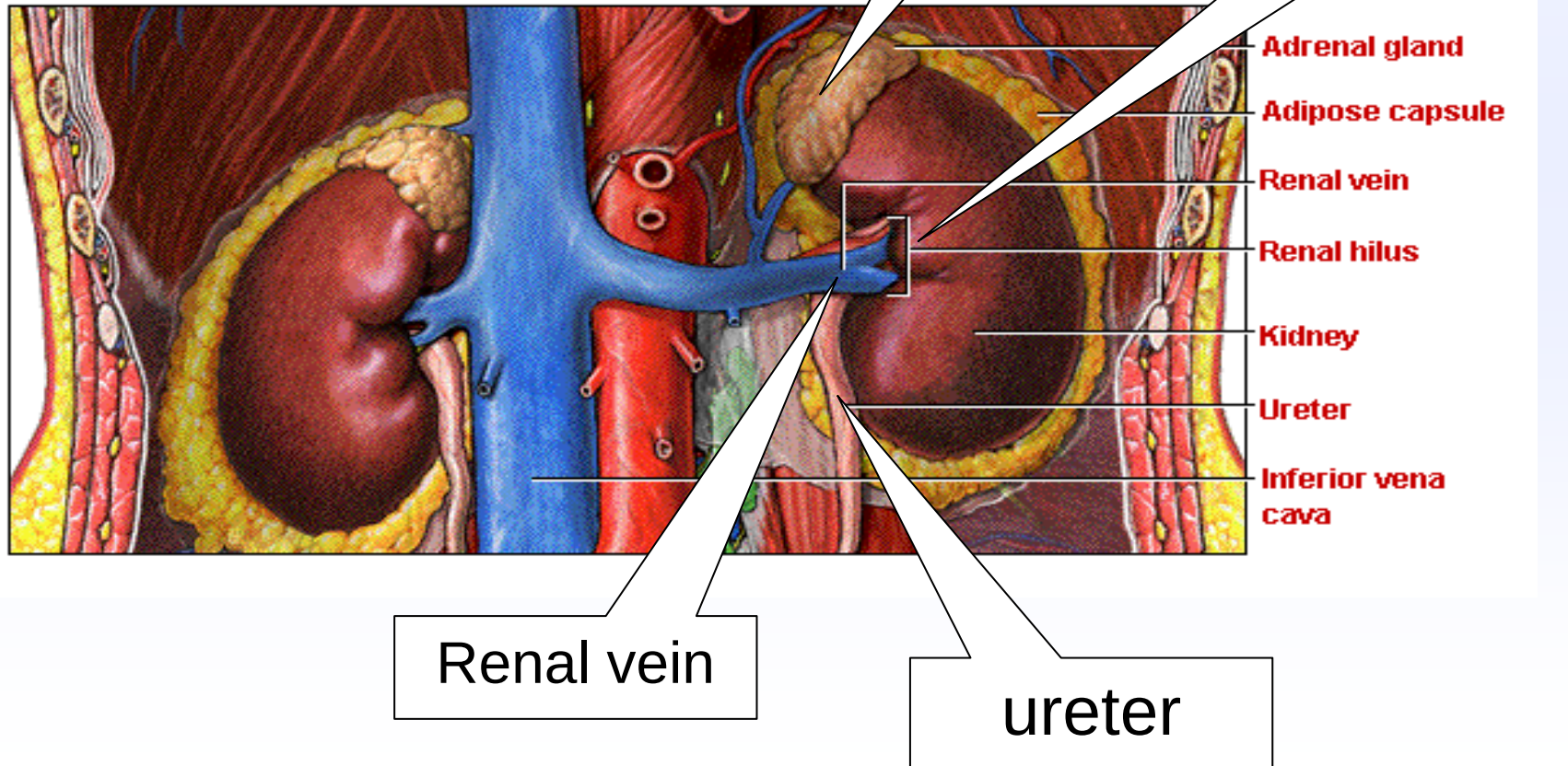
ระบบขับถ่ายปัสสาวะ

- ไต (kidney) 1 คู่
- ท่อไต (ureter) 1 คู่
- กระเพาะปัสสาวะ (urinary bladder)
- ท่อปัสสาวะ (urethra)



ไต (kidney)

โครงสร้างภายนอกของไต

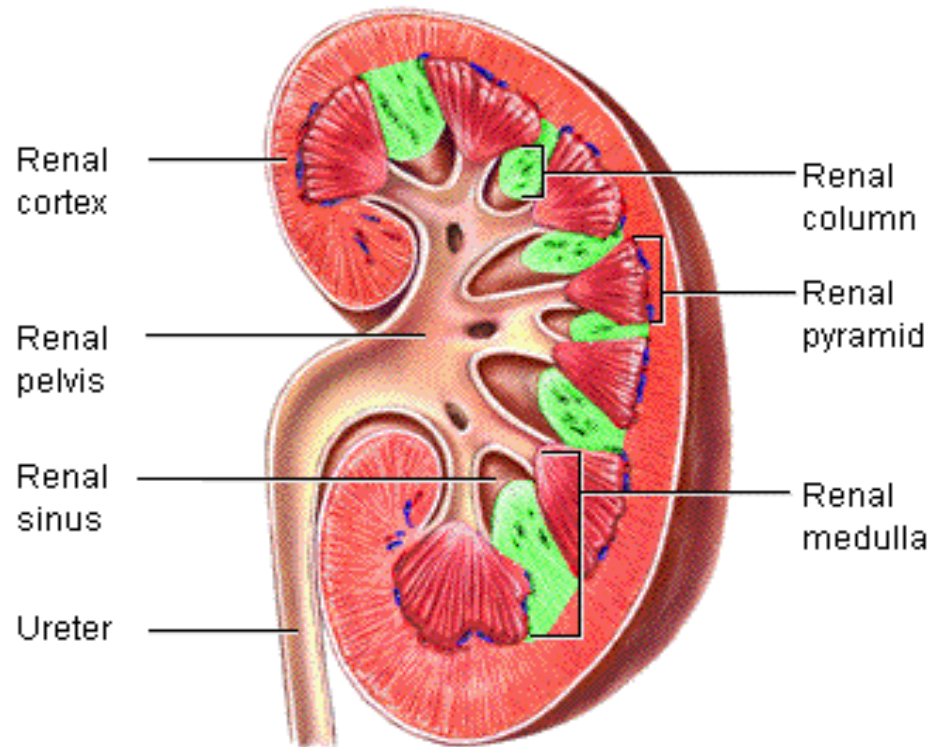


โครงสร้างภายในของไต

ไตแบ่งเป็น 2 ชั้น

- ไตชั้นนอก
(Renal cortex)

- ไตชั้นใน
(Renal medulla)



หน่วยไต (Nephron)

เป็นหน่วยที่เล็กที่สุดที่ทำหน้าที่ของไต

มี 2 แบบ

- Cortical nephron

- Juxtamedullary nephron

หน่วยไต (Nephron)

ประกอบด้วย

- โกลเมอรูลัส (glomerulus) กลุ่มเส้นเลือดฝอย
- Bowman's capsule (RENAL CORPUSCLE)
- หลอดไตส่วนต้น (Proximal convoluted tubule : PCT)
- Loop of Henle : ท่อขาลง, ท่อขาขึ้น
- หลอดไตส่วนปลาย (Distal convoluted tubule : DCT)
- หลอดไตรวม (Collecting duct)

Early **distal convoluted tubule (DCT)**

Late distal convoluted tubule (DCT)

Cortical collecting duct

Proximal convoluted tubule (PCT)

Glomerular (Bowman's) capsule

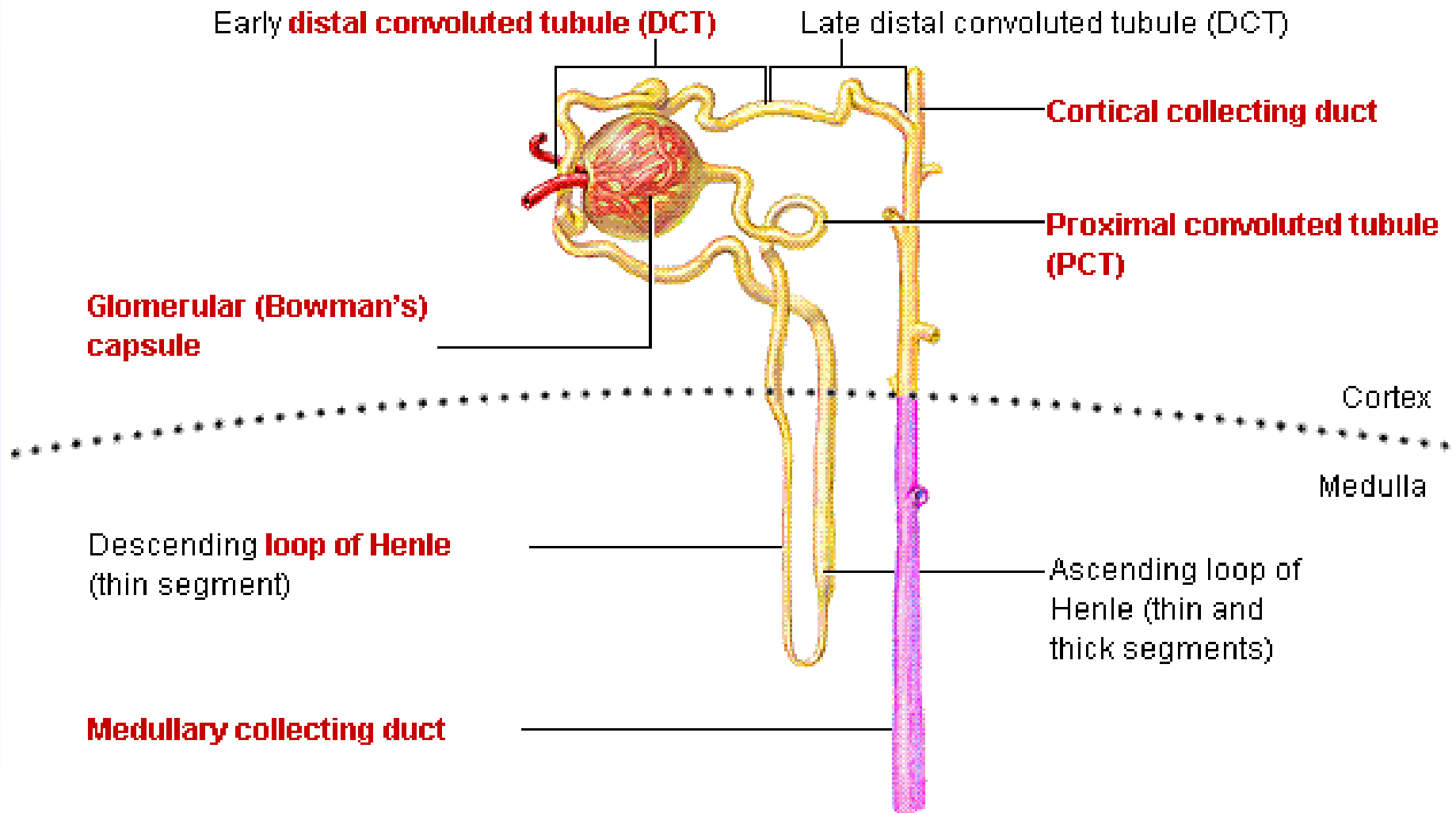
Cortex

Medulla

Descending **loop of Henle**
(thin segment)

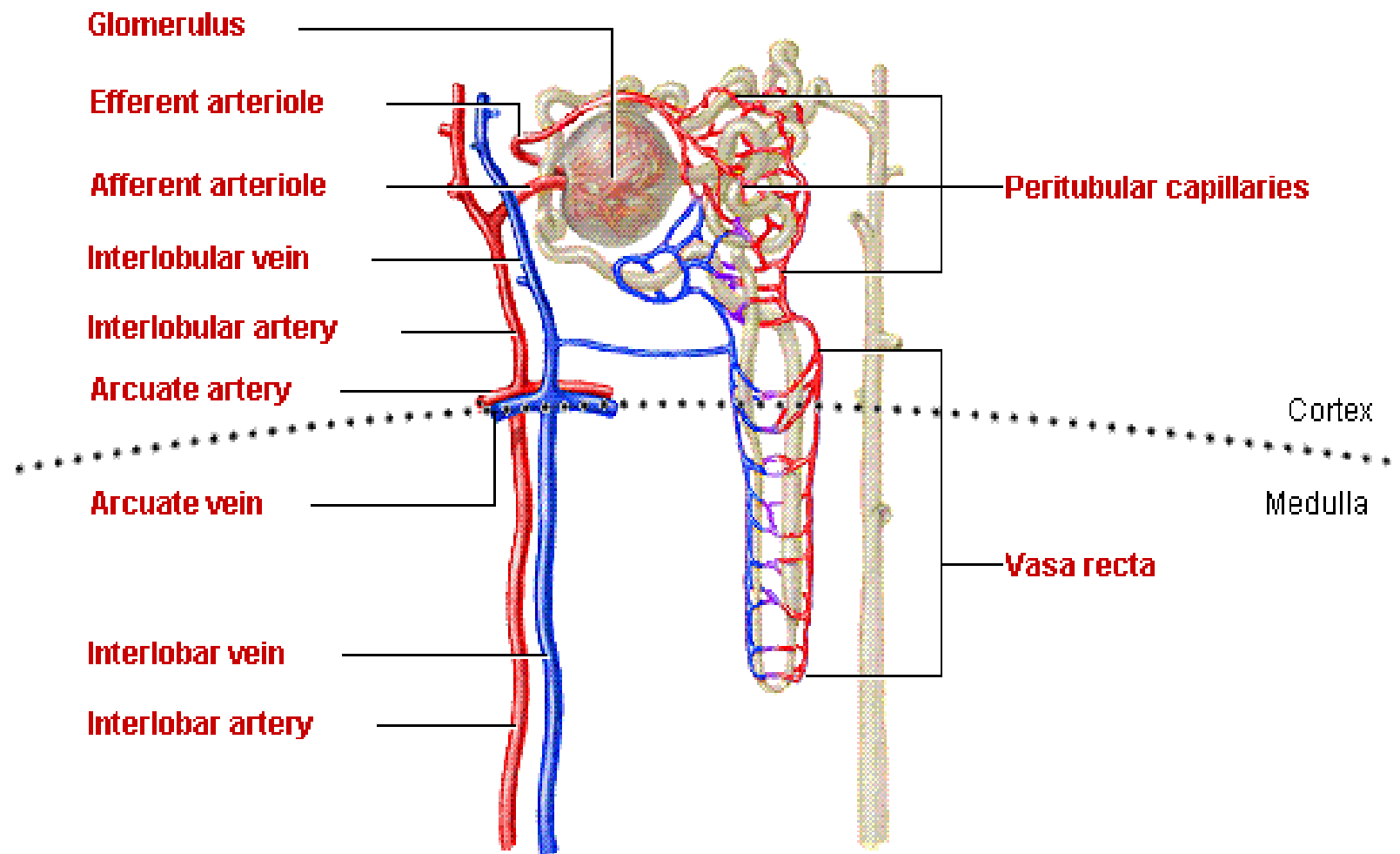
Ascending loop of
Henle (thin and
thick segments)

Medullary collecting duct



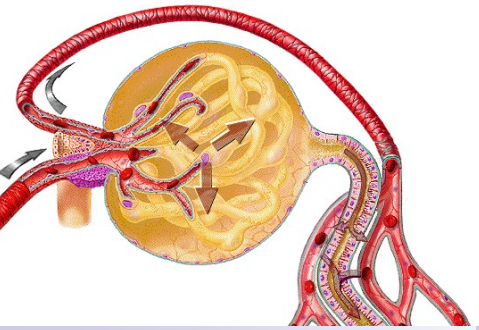
ระบบไหลเวียนเลือดที่ไตและหน่วยไต

- dorsal aorta
- renal artery
- afferent arteriole
- glomerulus
- efferent arteriole
- peritubular capillaries / vasa recta
- renal vein
- posterior vena cava



การบ้าน

- วาดรูปแสดงและชี้แสดงกายวิภาคภายนอกและภายในของไต
- วาดไดอะแกรมหน่วยไตทั้ง 2 แบบพร้อมชี้แสดง



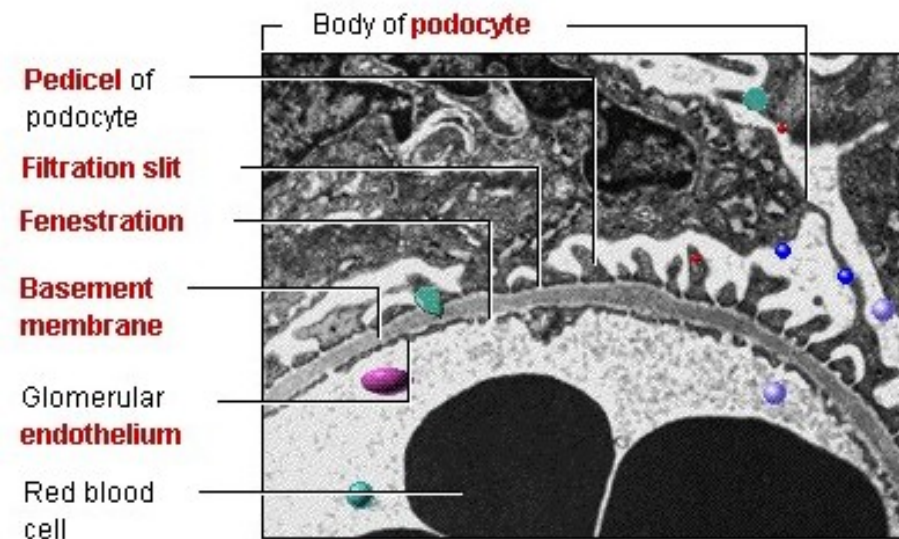
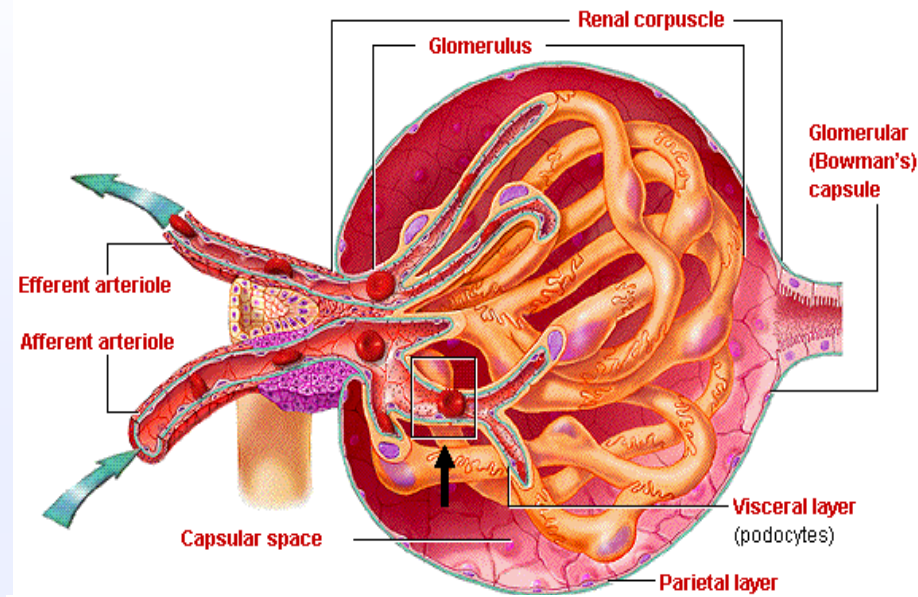
การทำงานของไต

1. การกรอง (Filtration)
2. การดูดซึมกลับ (Reabsorption)
3. การขับออก (Secretion)



การกรอง (Filtration)

- เกิดขึ้นที่ Renal corpuscle
- กรองเลือดในโกลเมอรูลัสผ่านที่ Bowman's capsule
- น้ำกรอง(Filtrate)



ความดันที่ทำให้เกิดการกรองมี 3 ชนิด

1. Hydrostatic pressure

ของเลือดในโกลเมอรูลัส

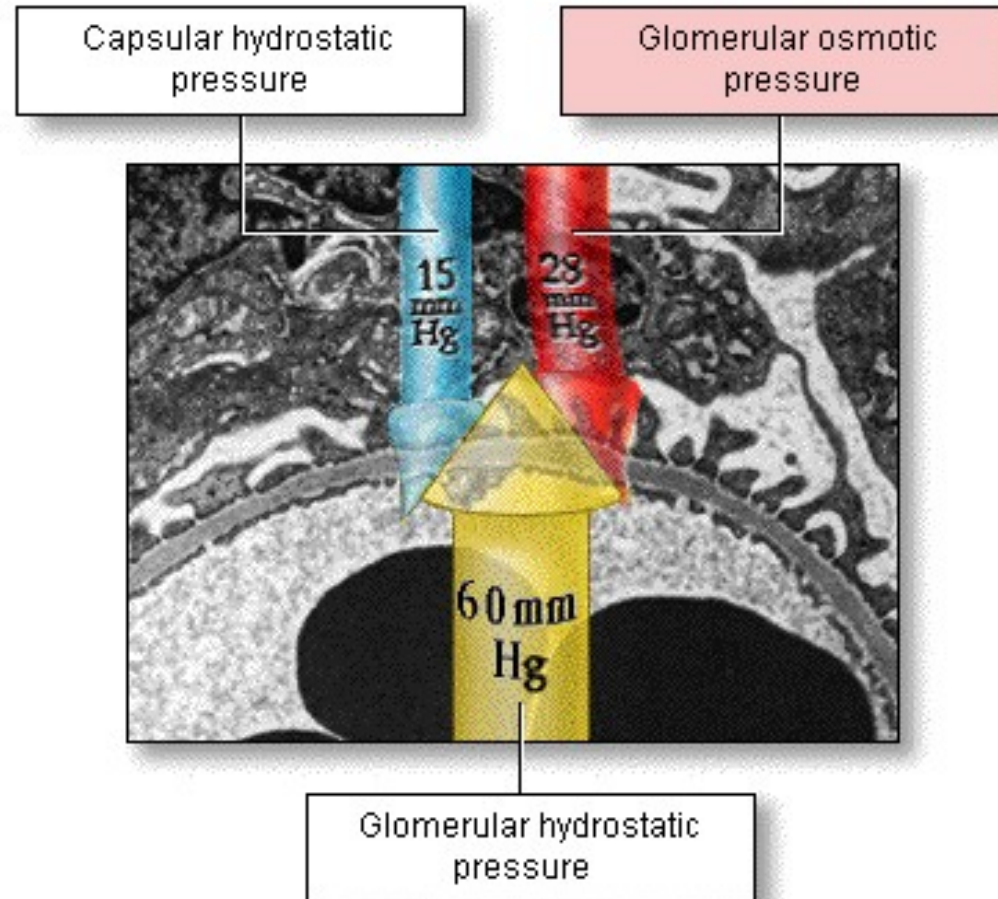
2. Osmotic pressure ของ

เลือดในโกลเมอรูลัส

3. Hydrostatic pressure

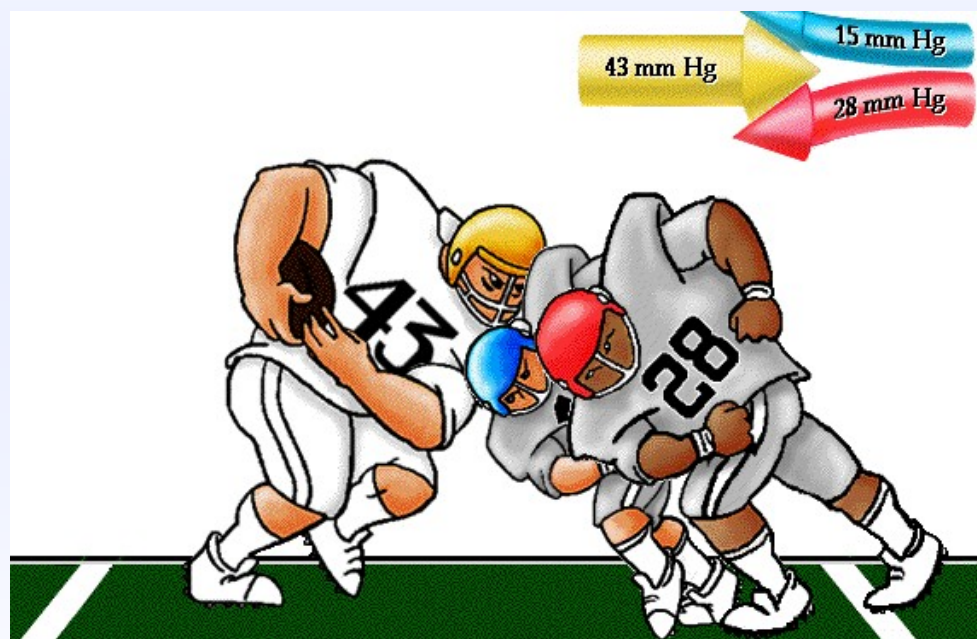
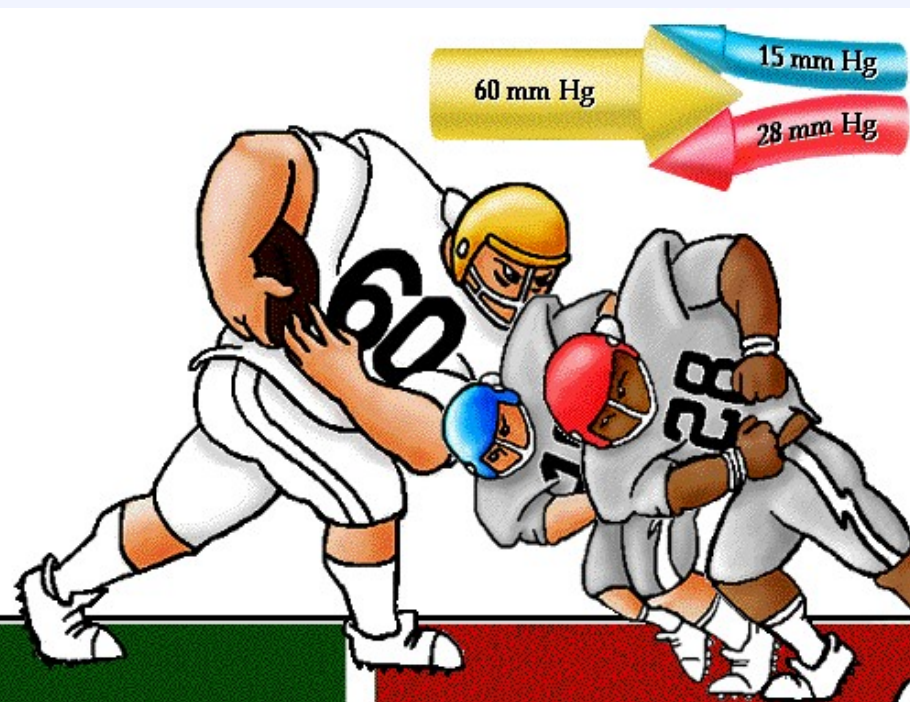
ของของเหลวใน

Bowman's capsule



การกรอง = ความดันที่ 1 — (ความดันที่ 2 + ความดันที่ 3)

ความดันที่ทำให้เกิดการกรอง



อัตราการกรอง Glomerular filtration rate (GFR)

- คือ ปริมาณน้ำกรอง มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
- คำนวณค่า GFR ได้จากการวัดค่า renal clearance ของ inulin
- มีคุณสมบัติ
 - ☐ กรองผ่านโกลเมอรูลัสได้อย่างอิสระ
 - ☐ ไม่ถูกเมแทบอลิซึม
 - ☐ ไม่คักหลังจากเซลล์บุท่อไต

Renal clearance ของ inulin

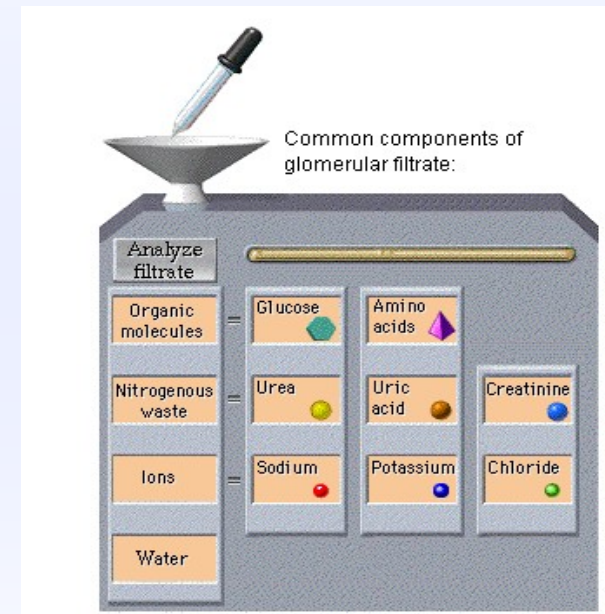
$$U_x V \div P_x$$

- U_x คือ ปริมาณของ inulin ในปัสสาวะ 1 ลบ.ซม.
- V คือ ปริมาตรของปัสสาวะที่ขับออกมาใน 1 นาที
- P_x คือ ปริมาณของ inulin ในพลาสมา 1 ลบ.ซม.

องค์ประกอบในน้ำกรอง

ประกอบด้วย 4 กลุ่มหลัก

- สารอินทรีย์ กลูโคส กรดอมิโน
- สารไนโตรเจน ยูเรีย กรดยูริก ครีเอทีนีน
- ประจุ Na^+ , K^+ , Cl^-
- น้ำ



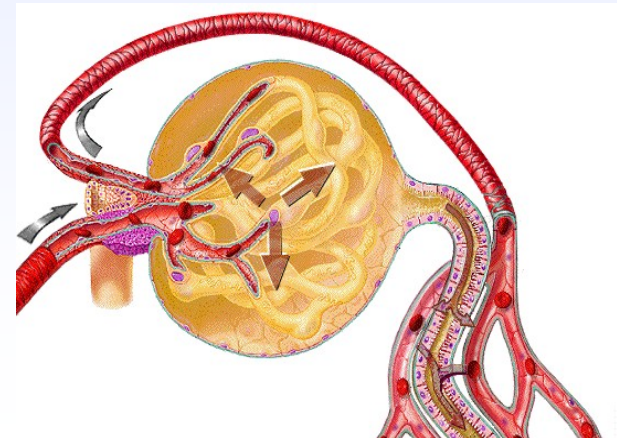
การบ้าน

■ จงอธิบายสรุปว่า

- ☐ น้ำกรอง คืออะไร
- ☐ ไปได้มาอย่างไร
- ☐ วัดอัตราการกรองได้อย่างไร

การดูดซึมกลับ (Reabsorption)

- เซลล์บุท่อไต ดูดกลับสารที่เป็นที่ต้องการของร่างกาย เช่น กลูโคส
- สารที่พบในปัสสาวะน้อยกว่าที่พบในน้ำกรอง แสดงว่าถูกดูดซึมกลับ



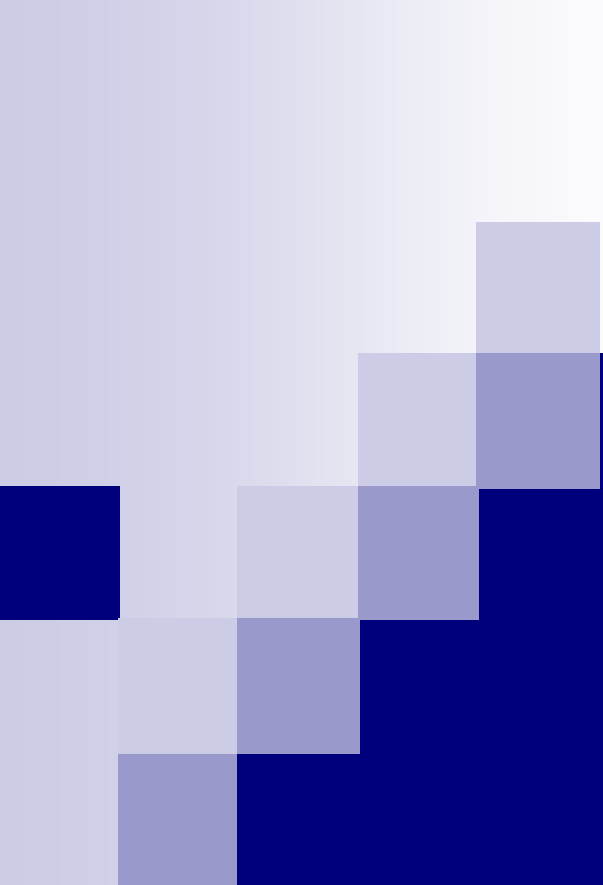
การคัดหลั่งออก (Secretion)

- สารใดพบในปัสสาวะมากกว่าในน้ำกรอง แสดงว่ามีการคัดหลั่งจากเซลล์บุท่อ เช่น ยูเรีย
- การคัดหลั่งออกเป็นการกำจัดสารออกจากร่างกาย
- ความสามารถของไตในการกำจัดสาร บอกได้ด้วยค่า **clearance ratio** ของสารนั้นๆ กับ inulin

$$= \frac{U_x V}{P_x} \div \frac{U_i V}{P_i}$$

ดังนั้น

- สารใดไม่ถูกดูดซึมกลับ หรือไม่มีการคัดหลั่งออก จะมีค่า **clearance ratio** เท่ากับ 1
- **Para-amino hippuric acid (PAH)** กรองได้อิสระ ไม่ถูกดูดซึมกลับ แต่มีการคัดหลั่งออกจากเซลล์บุท่อไต จะมีค่า **CR** เท่าไร
- ความเข้มข้นของสารในปัสสาวะระบุเป็น อัตราส่วนของสารในปัสสาวะต่อในน้ำเลือด (**Urea/Plasma ratio**)

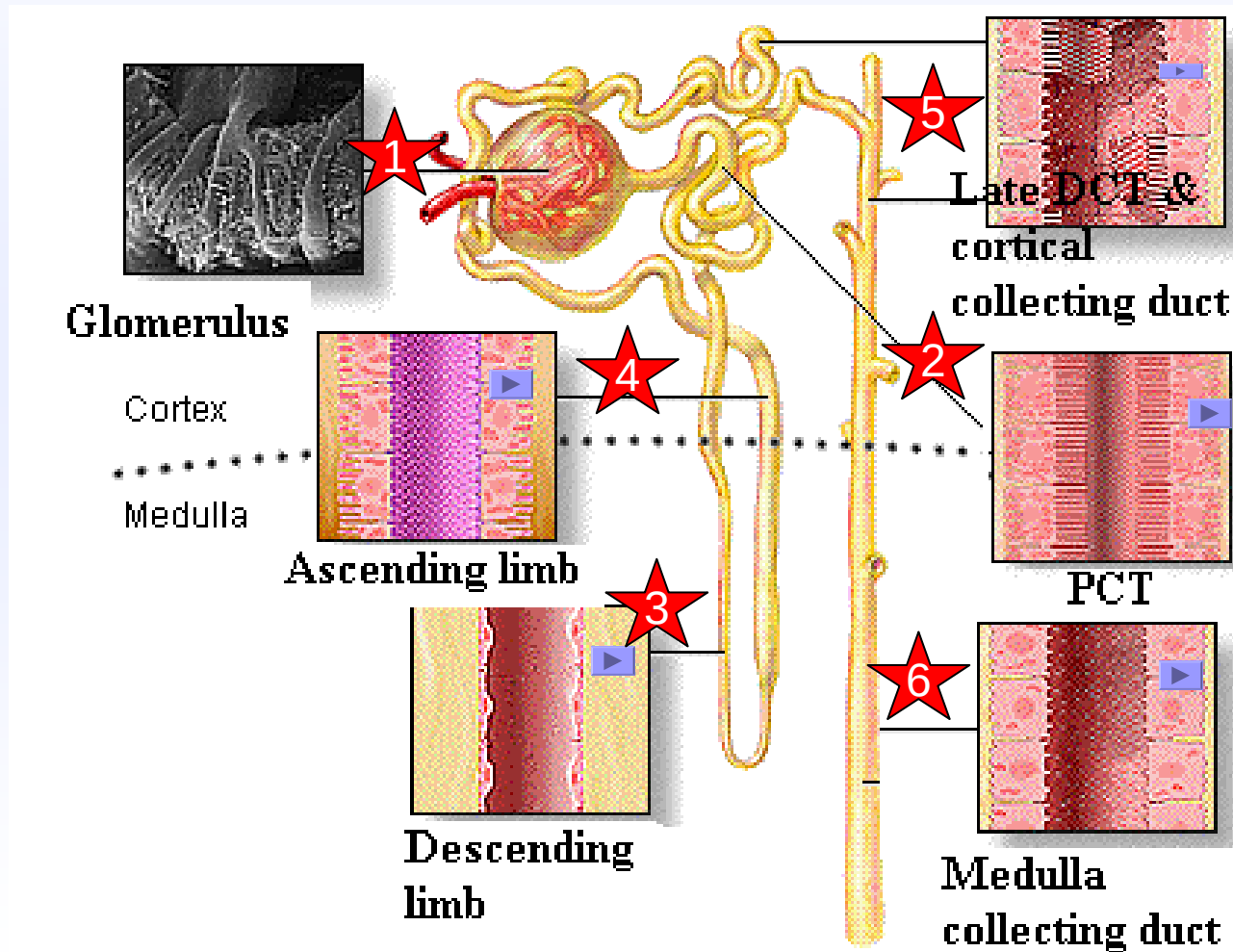


การสร้างปัสสาวะ

การสร้างปัสสาวะ (Urine formation)

- ปัสสาวะสามารถเป็น hypertonic
- ความเข้มข้นเกิดจากลักษณะเฉพาะตัวของท่อไต โดยเฉพาะที่ **loop of Henle**
- ขึ้นอยู่กับการดูดซึมกลับ และการคัดหลั่งออก Na^+ , Cl^- น้ำ และยูเรีย
- กลไกการเข้าออกของสารเหล่านี้เกิดขึ้นที่
 - หลอดไตส่วนต้น (PCT)
 - loop of Henle
 - Vasa recta

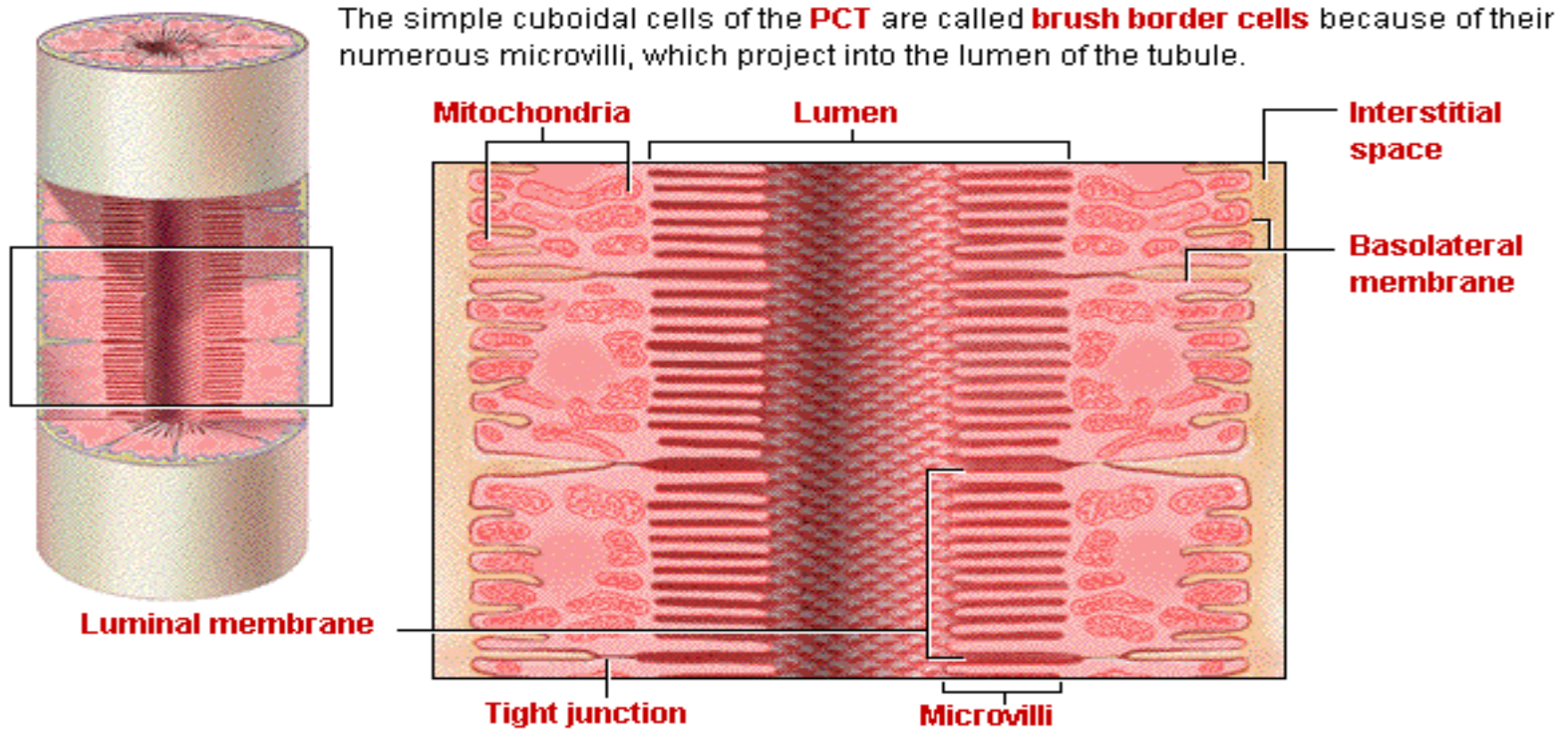
การกรอง การดูดซึมกลับ และการคัดหลั่งออก เกิดจาก ลักษณะของเซลล์บุท่อไต ที่แตกต่างกัน



ที่หลอดไตส่วนต้น (PCT)

- Na^+ ถูกดูดซึมกลับโดย **active transport**
- น้ำถูกดูดกลับตามโซเดียม
- H^+ ถูกคัดหลั่งออกไปในน้ำกรองเพื่อรักษาสมดุลกรดต่าง
- ผลลัพธ์คือประมาณ 65 % ของสารต่างๆ ถูกดูดซึมกลับคืนจากน้ำกรอง รวมถึงกลูโคส และกรดอะมิโนดูดซึมกลับหมด
- น้ำกรองมีสภาพเป็น **iso-osmotic**

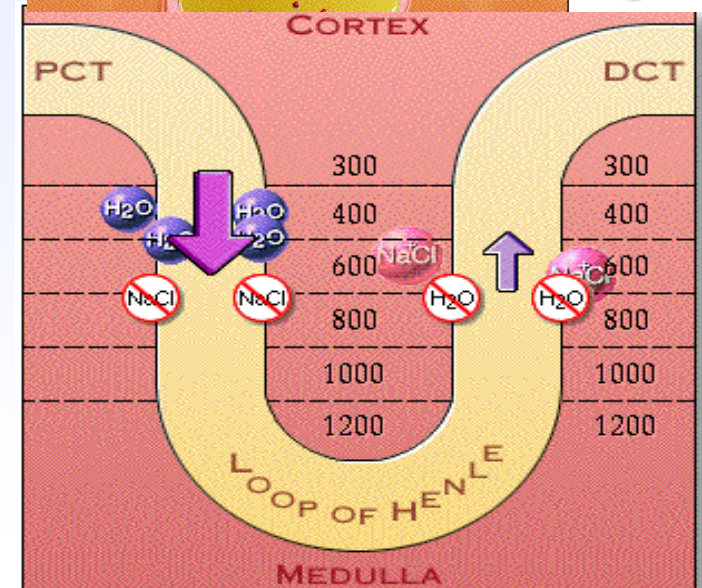
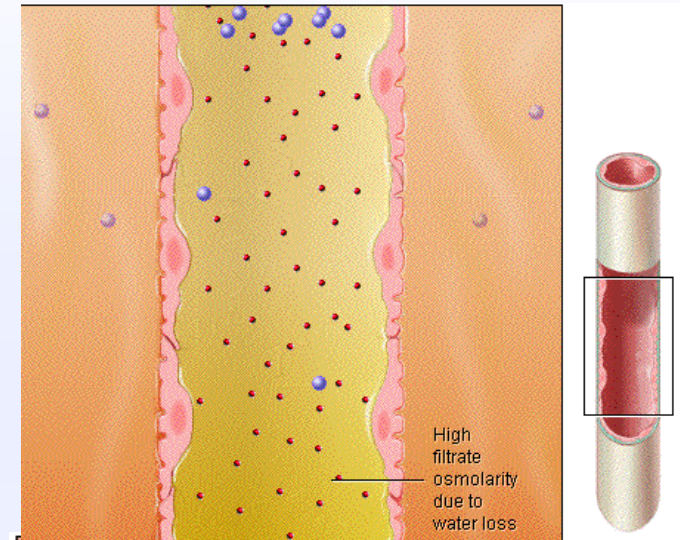
Proximal Convoluted Tubule



ที่ loop of Henle

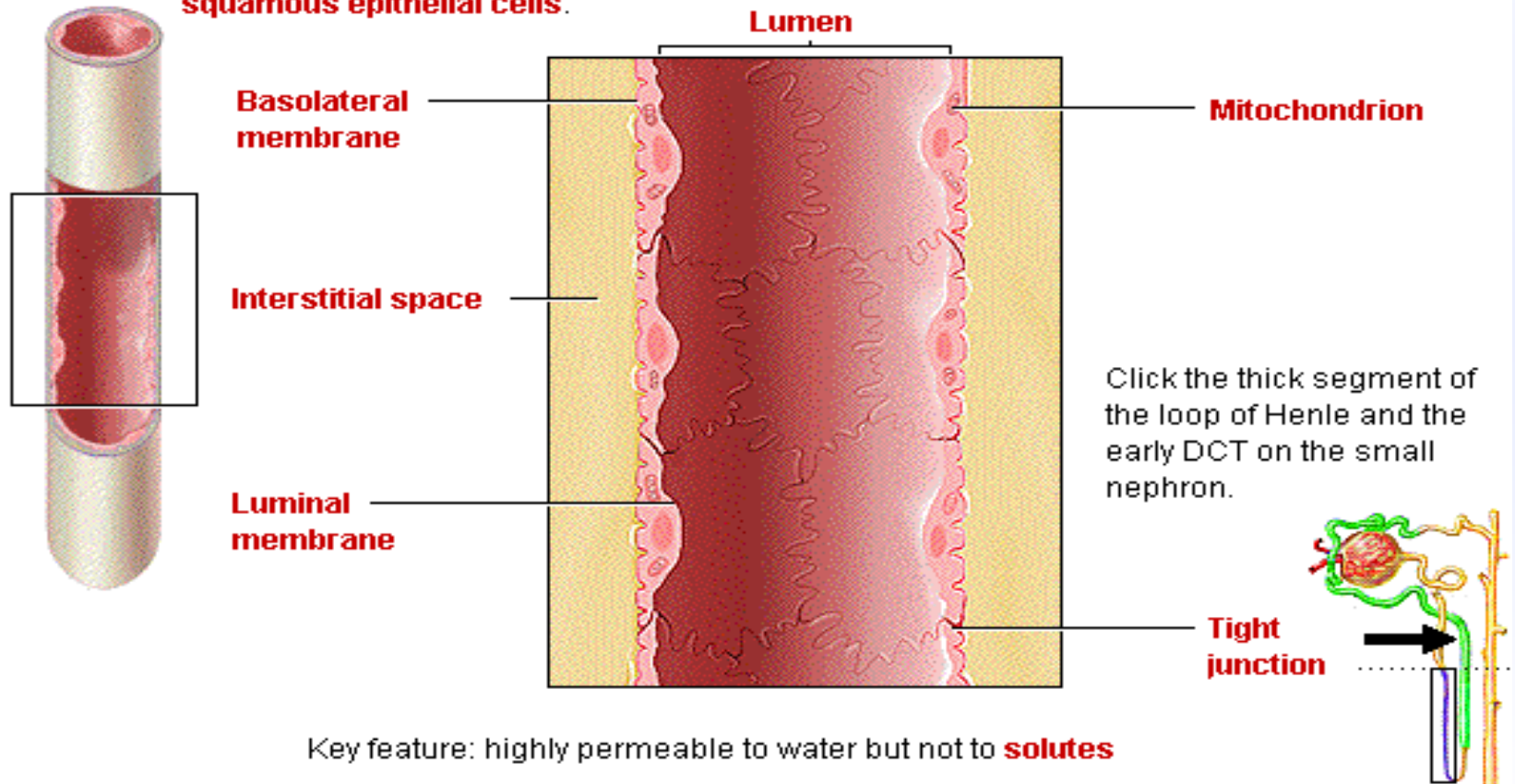
■ ท่อขาลง ผั่งบาง

- ☐ ยอมให้น้ำผ่านได้ดี น้ำถูกดูดซึมกลับ
- ☐ แต่ประจุต่างๆ และยูเรียผ่านได้น้อย
- ☐ **hyperosmotic**



Descending loop of Henle

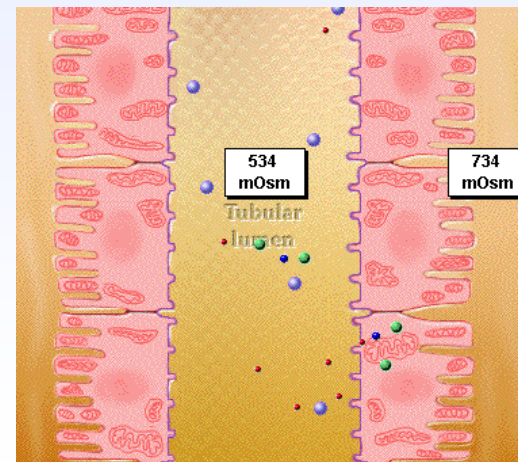
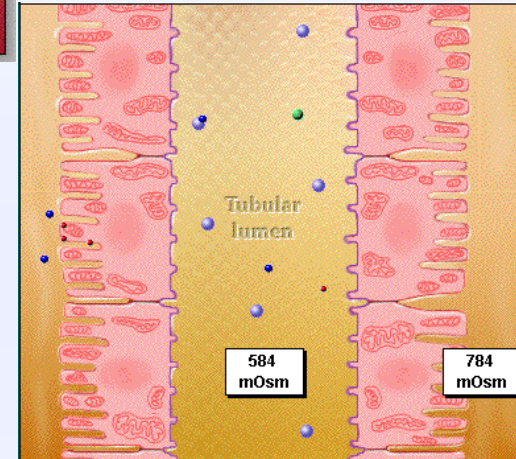
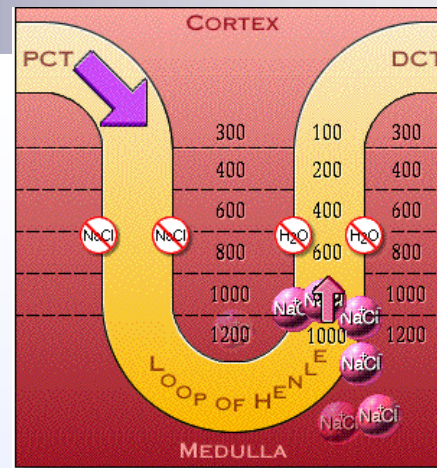
The cells of the thin segment of the **descending loop of Henle** are **simple squamous epithelial cells**.



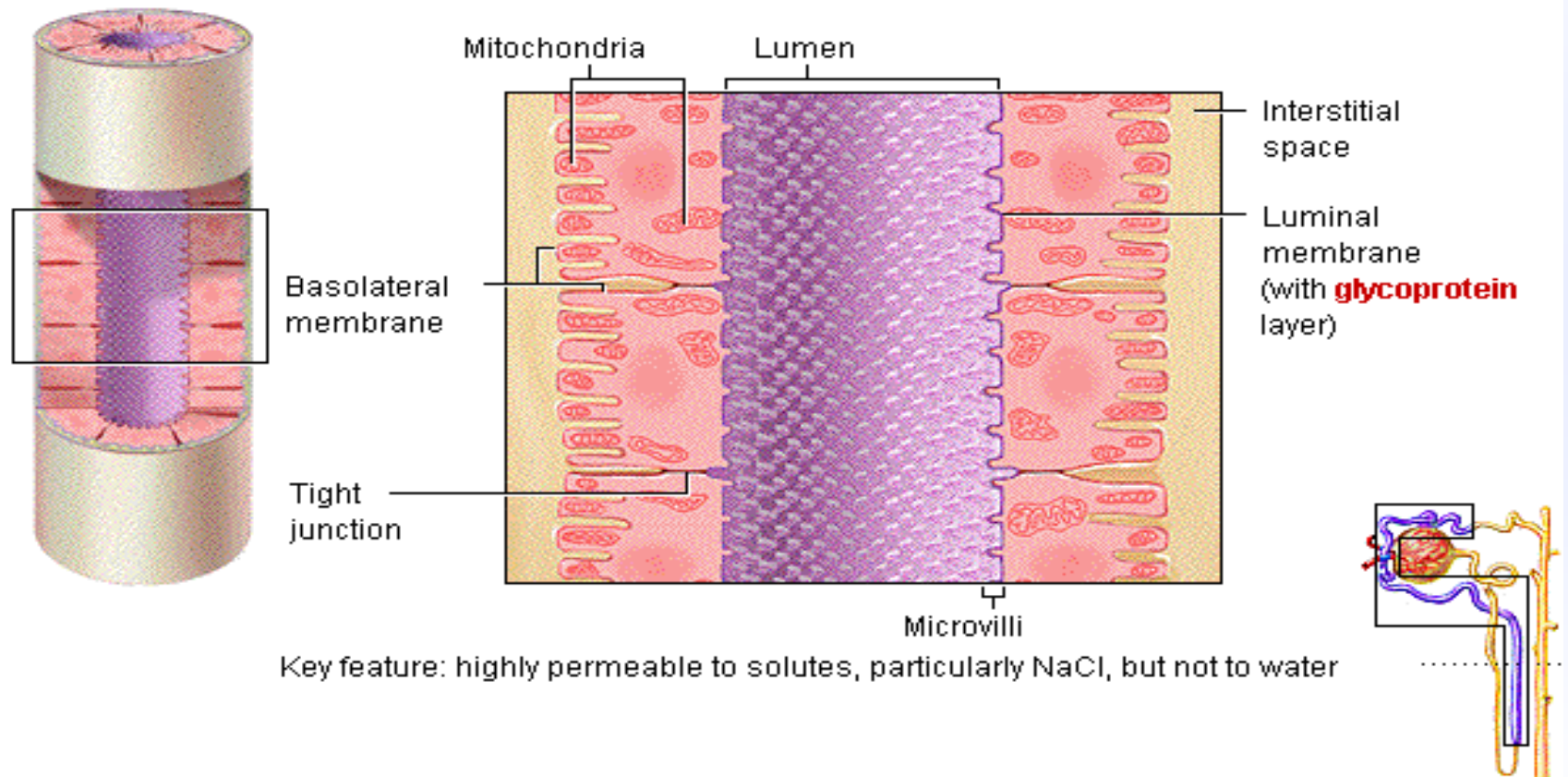
ที่ loop of Henle

■ ท่อขาขึ้น

- ☐ Na^+ , Cl^- ถูกดูดซึมกลับ
- ☐ แต่ไม่ยอมให้น้ำผ่าน
- ☐ ความเข้มข้นของของเหลว
เจือจางมากกว่าท่อขาลง
- ☐ ของเหลวในท่อที่อยู่ลึกใน
ชั้นในของไตเข้มข้นกว่าที่อยู่
ส่วนชั้นนอก



Ascending loop & DCT

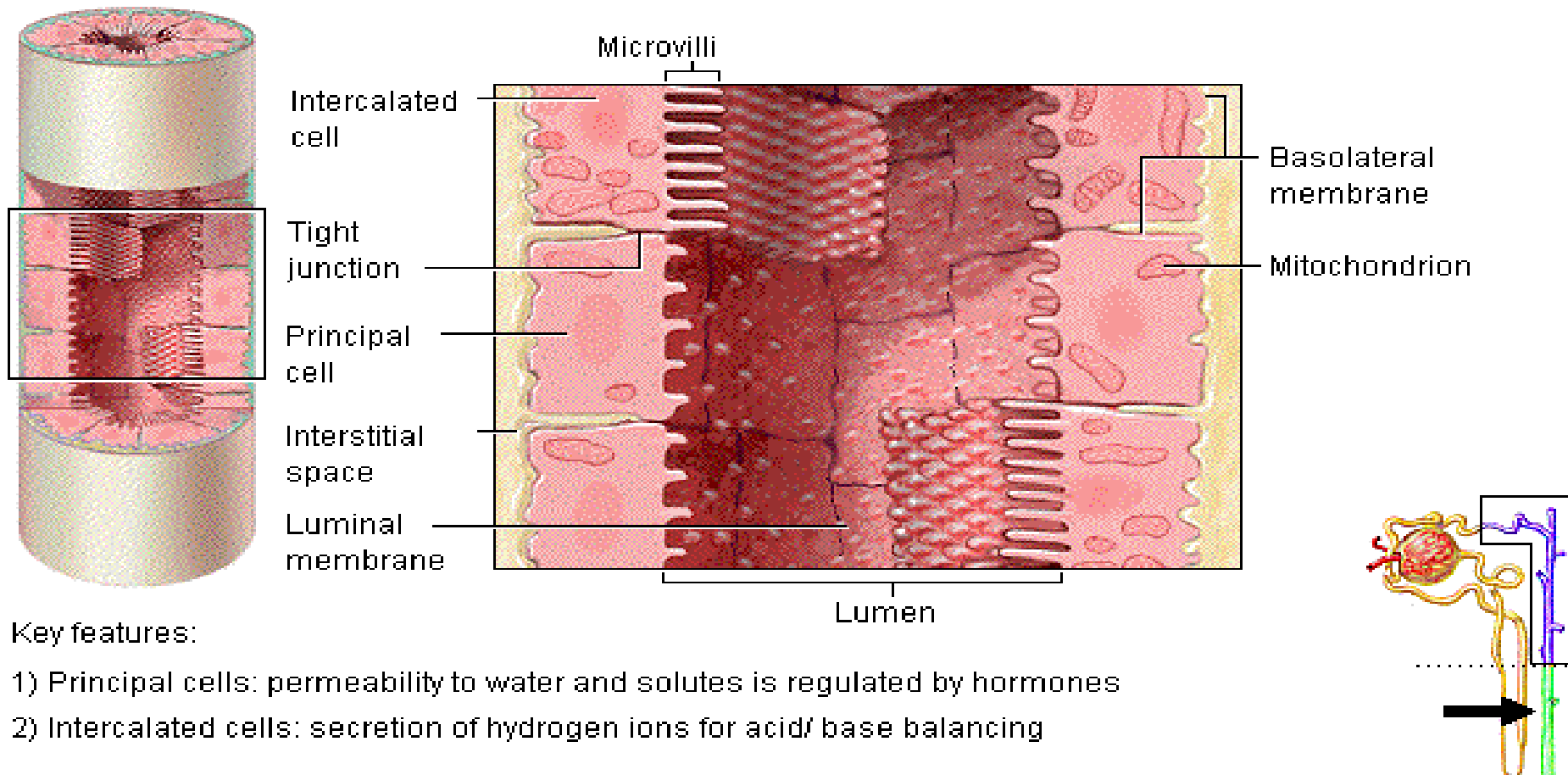


ที่หลอดไตส่วนปลาย (DCT)

- **hypo-osmotic** เล็กน้อย แต่มีปริมาตรลดลง
- **Na^+** ถูกดูดซึมกลับด้วย **active transport**
- **Cl^+ , HCO_3^-** และน้ำ ตามโซเดียม ด้วย **passive transport**
- **K^+ , H^+ , NH_4^+** ถูกขับออก
- **iso-osmotic**



Late DCt & Cortical Collecting Duct

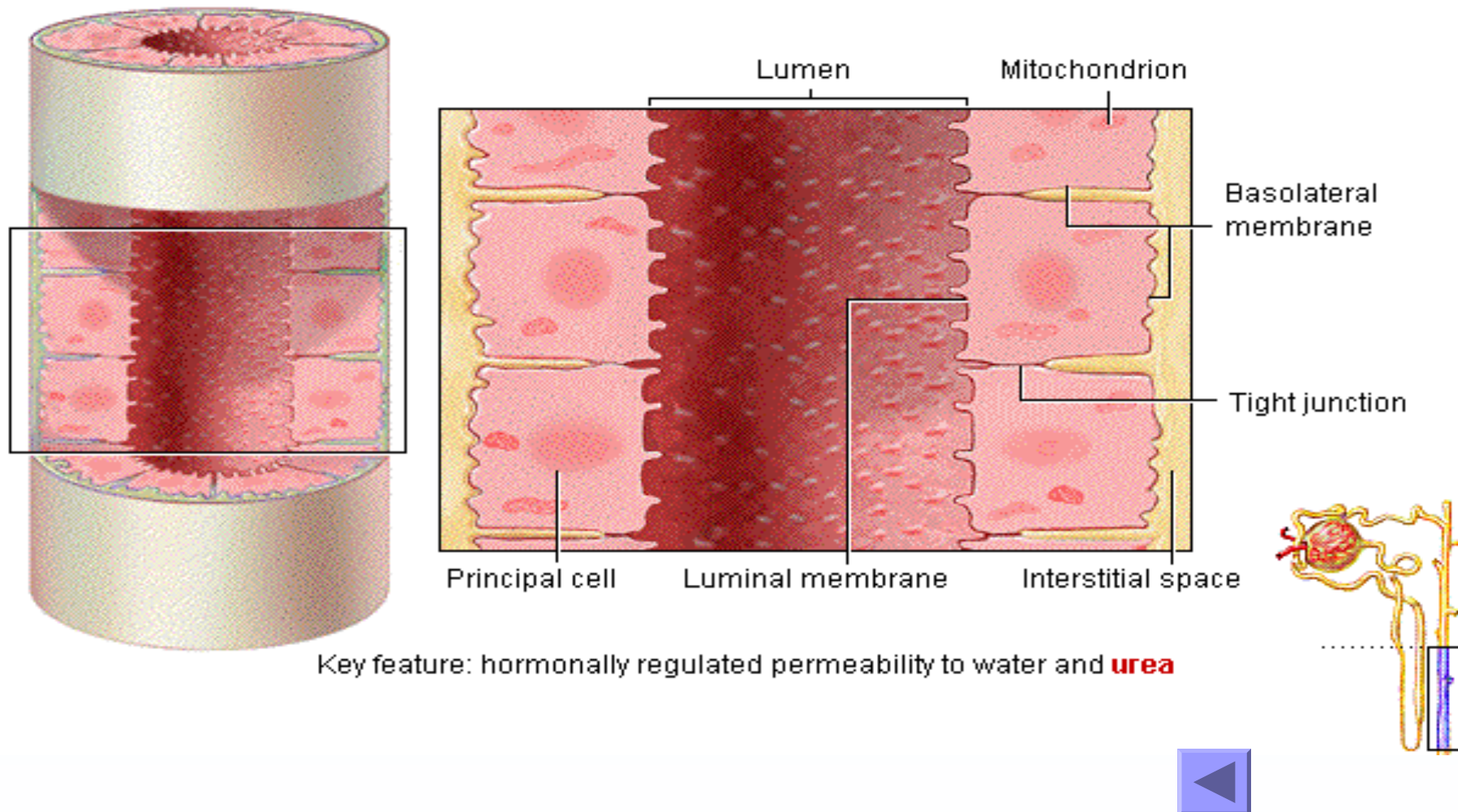


ที่หลอดไตรวม และท่อไตรวม

(collecting tubule & collecting duct)

- Na^+ ถูกดูดซึมกลับ
- Cl^- , K^+ ถูกขับออก
- ความเข้มข้นสุดท้ายของปัสสาวะอยู่ภายใต้อิทธิพลของฮอร์โมน ADH
 - ถ้ามี ADH ปัสสาวะเป็น hyperosmotic
 - ถ้าไม่มี ADH ปัสสาวะเป็น hypo-osmotic
 - ADH ช่วยรักษาสมดุลน้ำของร่างกาย
- ฮอร์โมน aldosterone

Medulla Collecting Duct

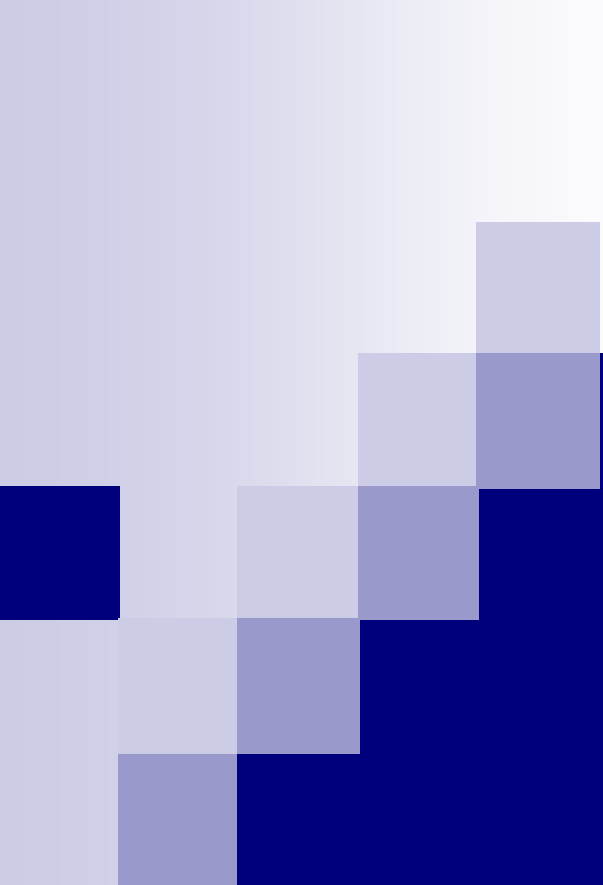


การบ้าน

- จงสรุปการผ่านเข้าออกของสารและลักษณะความเข้มข้นของของเหลวที่บริเวณ
 - ☐ หลอดไตส่วนต้น
 - ☐ loop of Henle
 - ☐ ท่อไตรวม และหลอดไตรวม

Counter current mechanism

- เป็นกลไกทำให้ปัสสาวะมีความเข้มข้น โดยอาศัยความแตกต่างของความเข้มข้น ของเนื้อเยื่อที่ไตชั้นนอก และ ไตชั้นใน
- เป็นการไหลเวียนย้อนของของเหลวและประจุต่างๆ ระหว่างท่อขาขึ้น ท่อขาลง ของ loop of Henle และเส้นเลือด vasa recta ที่หน่วยไตแบบ juxtamedullary nephron
- ศึกษาเพิ่มเติมจาก หนังสือสรีรวิทยา และคู่มือเรื่อง early filtrate processing



๒๓ : การรักษาสมดุสน้ำ

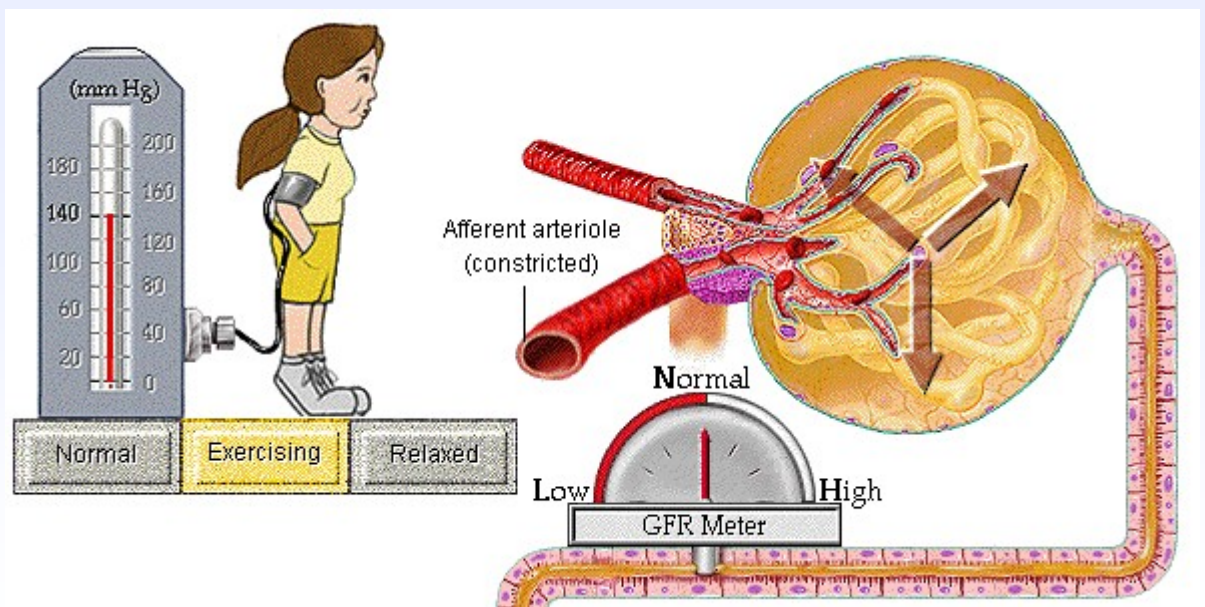
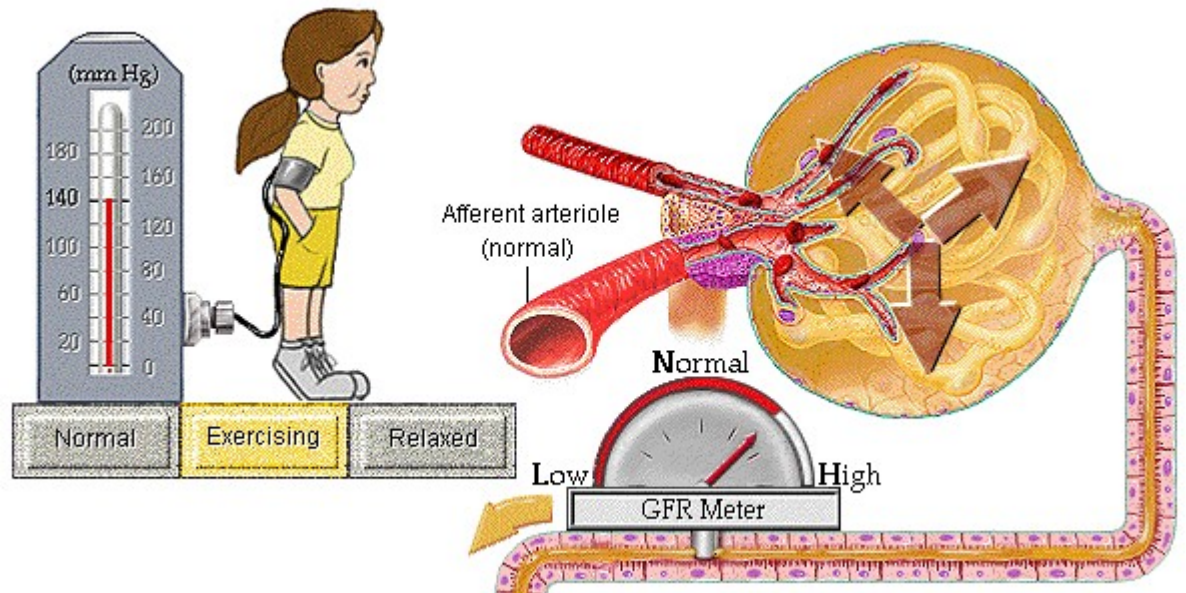
ไต : การรักษาสมดุลน้ำในร่างกาย

ไต รักษาสมดุลของน้ำโดยการควบคุมอัตราการกรอง

■ **การเปลี่ยนแปลงขนาดของเส้นเลือด afferent**

arteriole ทำให้มีผลต่อปริมาณเลือดในโกลเมอรูลัส

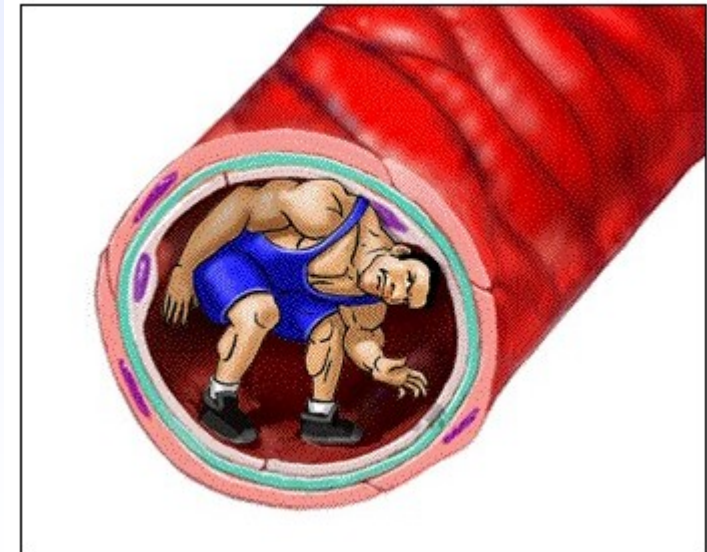
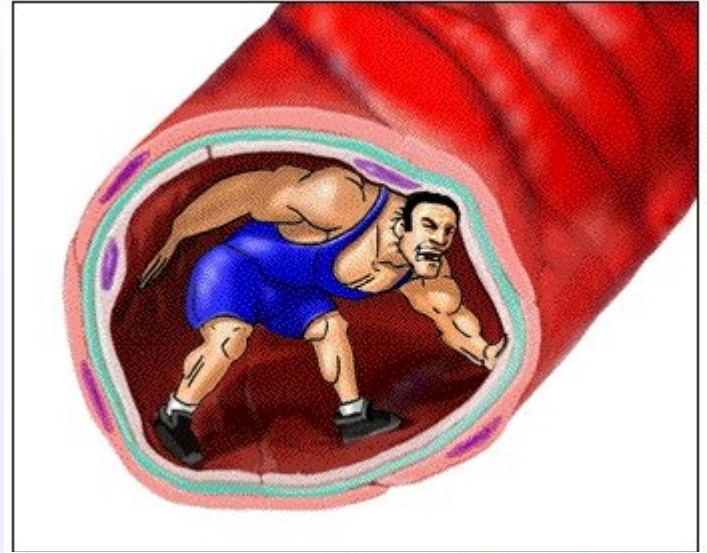
ซึ่งส่งผลถึงอัตราการกรอง



I. Myogenic mechanism

การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นเลือด
afferent arteriole เพื่อควบคุมอัตรา
การกรอง เป็นกลไกเนื่องจากคุณสมบัติ
ของกล้ามเนื้อเรียบที่บุผนังเส้นเลือด
(Myogenic mechanism)

คือ เมื่อมีแรงผลักดันภายในเส้นเลือด
กล้ามเนื้อที่บุผนังเส้นเลือดจะหดตัวสู้กับ
แรงดัน ทำให้เส้นเลือดมีขนาดเล็กลง

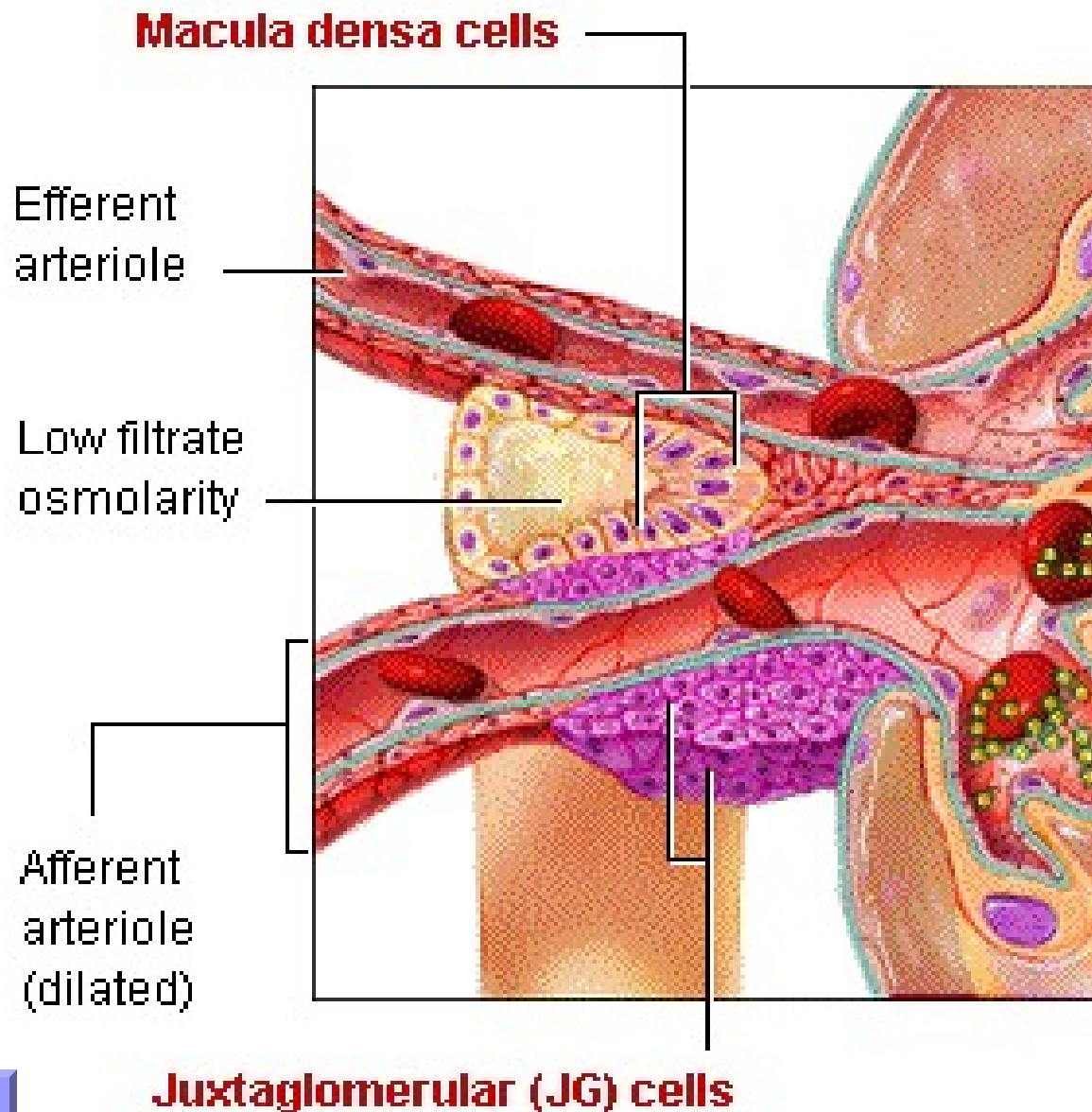


II. Tubuloglomerular mechanism

เป็นกลไกควบคุมอัตราการกรอง โดยมีกลุ่มเซลล์พิเศษ **Juxtaglomerular apparatus** ที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำกรอง โดยการหลั่งสารเคมีออกมาเปลี่ยนแปลงขนาดของเส้นเลือดแดงย่อย arteriole

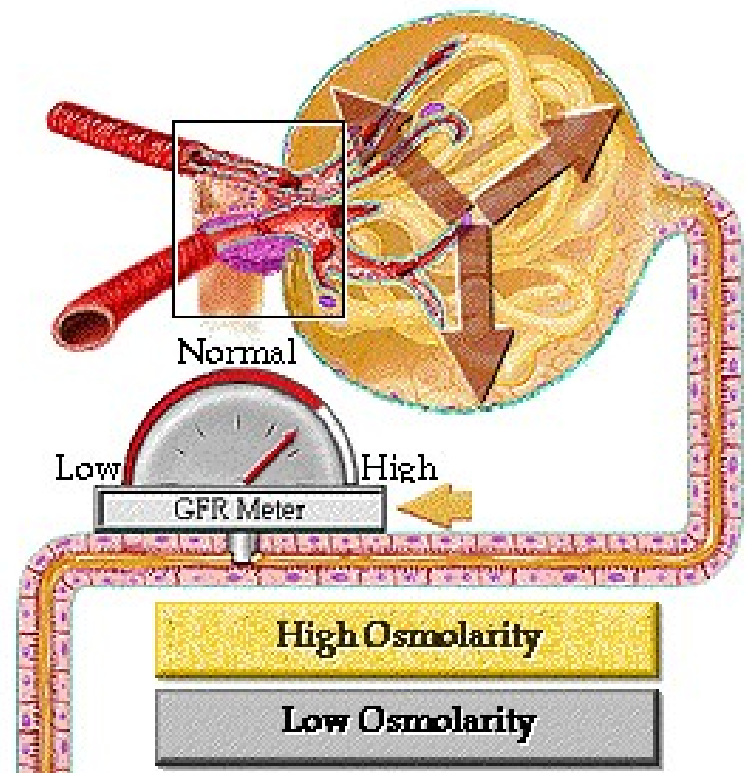
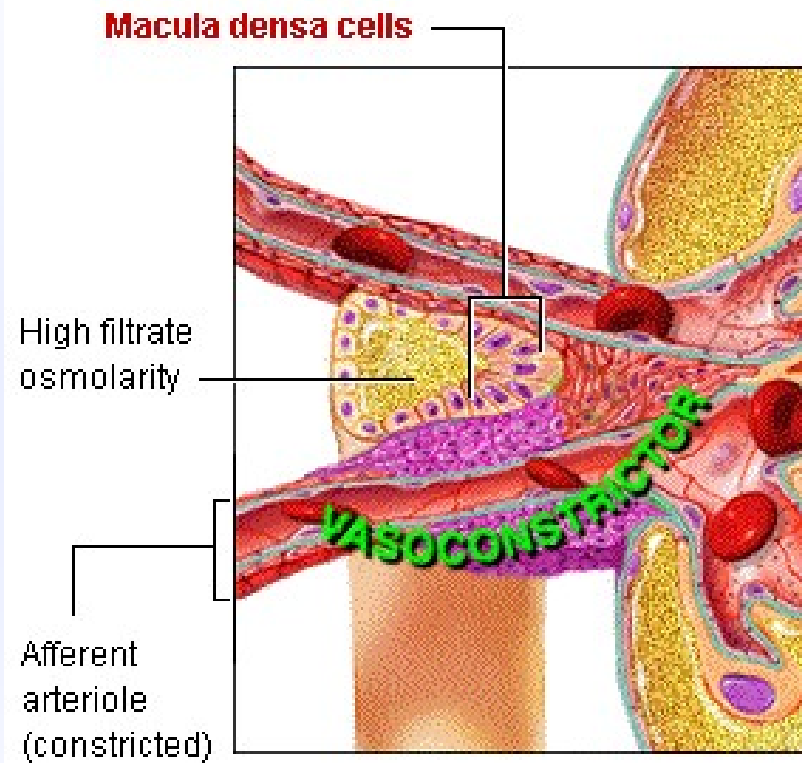
Juxtaglomerular apparatus

- **Macula densa cells** เป็นเซลล์พิเศษของท่อไต สร้างสาร **vasoconstrictor** มีผลให้เส้นเลือดหดตัว
- **Juxtaglomerular cells** เป็นเซลล์พิเศษของผนังเส้นเลือด afferent arteriole สร้าง **renin** มีผลให้เส้นเลือดขยายตัว



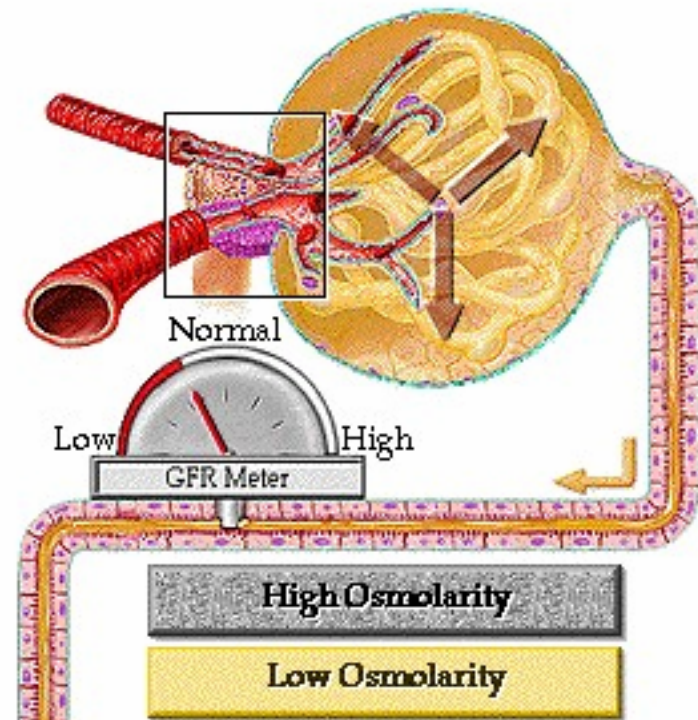
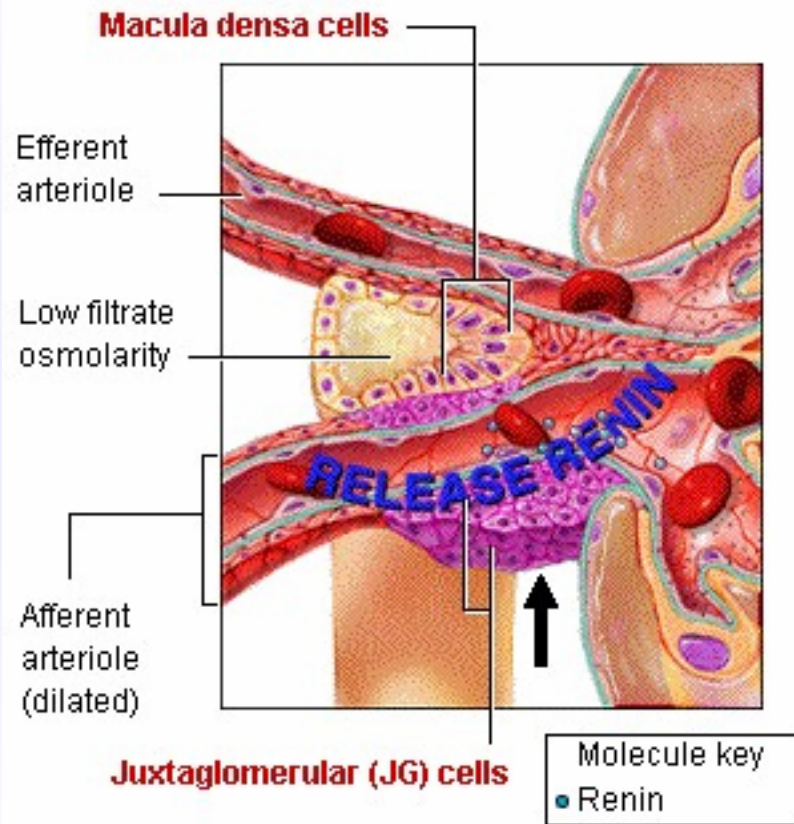
เมื่อน้ำกรองมีความเข้มข้นสูง (high osmolarity)

- macula densa หลั่งสาร vasoconstrictor มีผลให้
 - เส้นเลือด afferent arteriole หดตัว
 - ปริมาณเลือดไหลเข้าโกลเมอรูลัสลดลง
 - อัตราการกรองลดลง
 - อัตราการไหลของของเหลวผ่านท่อไตช้าลง ทำให้มีการดูดซึมโซเดียมกลับคืนมากขึ้น
 - ความเข้มข้นของน้ำกรองลดลง



เมื่อน้ำกรองมีความเข้มข้นต่ำ (low osmolarity)

- maculadensa cells หลั่งสาร vasoconstrictor ลดลง, ความดันเลือดลดลง และ
- กระตุ้น juxtaglomerular cells หลั่งสาร renin มีผลให้เส้นเลือดขยายตัว



ผลของ renin

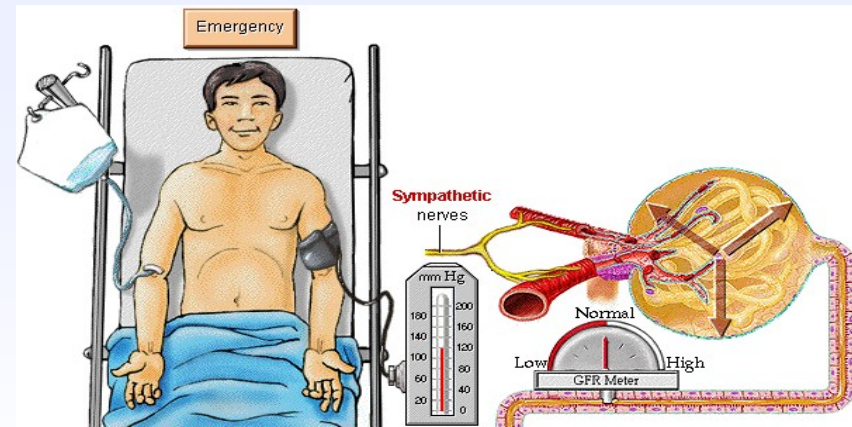
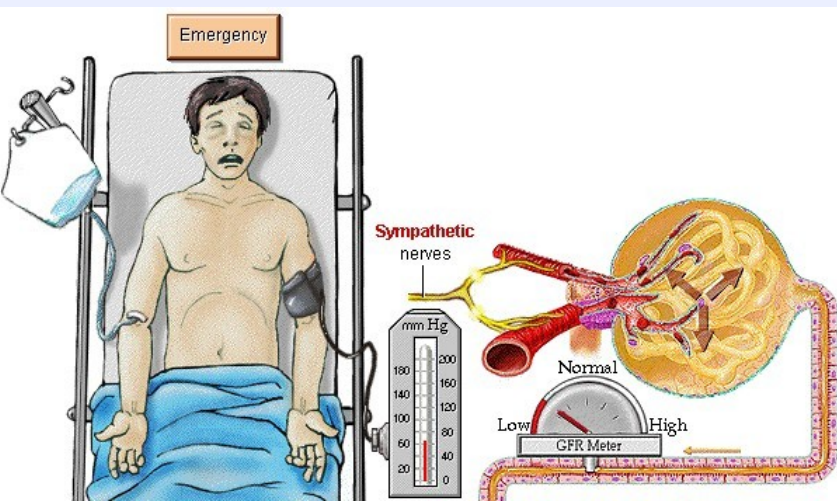
- กระตุ้นการสร้าง **angiotensin II** ซึ่งไปมีผลทำให้
 - ขนาดเส้นเลือด efferent arteriole เล็กลง
 - ปริมาณเลือดไหลออกจากโกลเมอรูลัสลดลง
 - ความดันเลือดในโกลเมอรูลัสเพิ่มขึ้น
 - อัตราการกรองเพิ่มขึ้น
 - กระตุ้นการหลั่ง aldosterone ทำให้เพิ่มการดูดซึม
กลีโคไซด์ียม และน้ำ ที่ท่อไตรวม

III. Sympathetic control

ในภาวะที่ร่างกายสูญเสียเลือดมากๆ เป็นภาวะฉุกเฉินที่ถึงตาย ระบบประสาทซิมพาธิติกจะมีบทบาทเหนือการทำงานตามปกติของไต ทำให้กิจกรรมของไตลดลง คือไปมีผลทำให้

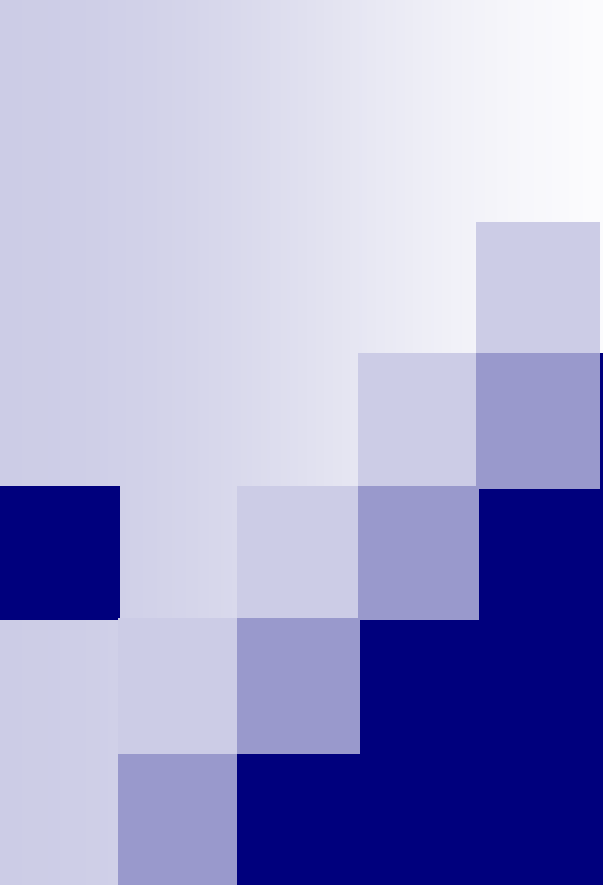
- เลือดจากไตถูกส่งไปเลี้ยงอวัยวะที่สำคัญ
- อัตราการกรองลดลง เพื่อลดการสูญเสียของเหลวจากเลือด
- แต่ไม่สามารถปล่อยให้เกิดเหตุการณ์อย่างต่อเนื่อง เพราะเกิดการสะสมของเสียในเลือด จึงต้องแก้ปัญหา

- การให้เลือดจะช่วยให้ความดันเลือดเป็นปกติ
- การทำงานประสาทซิมพาธิคลดลง
- เส้นเลือดแดงย่อยมีขนาดตามปกติ
- อัตราการกรอง และการไหลของของเหลวในท่อไตเป็นปกติ



การบ้าน

- จงสรุปกลไกที่ไตใช้ในการรักษาสมดุลน้ำ



๒๓: การรักษาสมดุลกรดต่าง

ในภาวะปกติ

- $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ จากการเมแทบอลิซึมของเซลล์ในท่อไต ได้กรดอ่อน HCO_3 ซึ่งแตกตัวเป็น HCO_3^- และ H^+
- H^+ ขับออกที่ท่อไตส่วนต้น แลกกับการดูดกลับ Na^+
- H^+ ถูกกำจัดออกไปกับน้ำกรอง เพื่อไม่สะสมเป็น

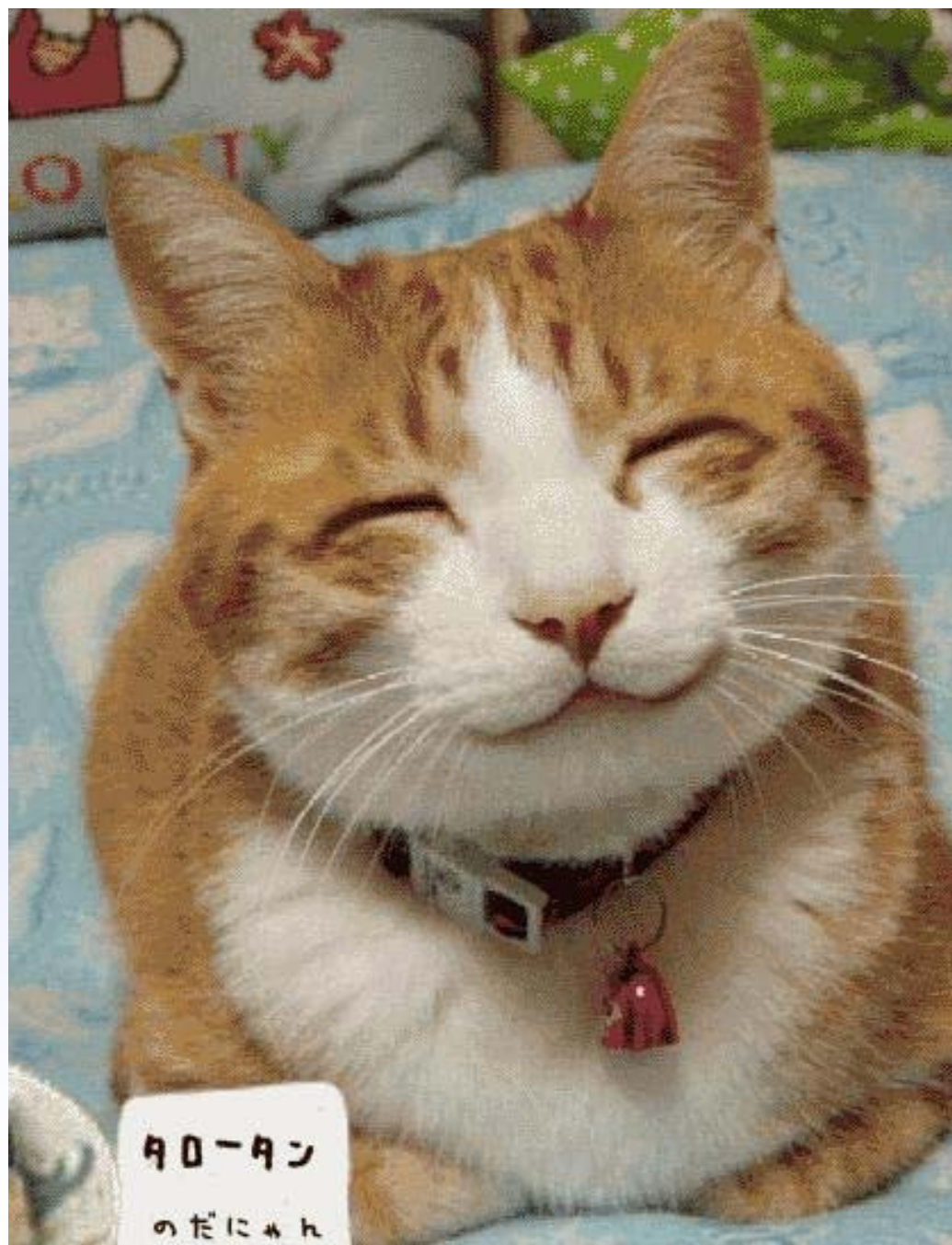
กรด

ในภาวะ acidosis

- มี HCO_3^- น้อย H^+ มาก ในเลือด ร่างกายมีความเป็นกรด
- เพื่อรักษาสสมดุล
 - HCO_3^- แพร่เข้าสู่กระแสเลือด
 - H^+ ถูกคัดหลั่งออกไปในน้ำกรองแลกเปลี่ยนกับการดูดซึมกลับ Na^+
- ผลที่ได้คือ เลือดมี HCO_3^- เพิ่มขึ้น มี CO_2 ลดลง ค่า pH ของของร่างกายกลับสู่ปกติ

ในภาวะ **alkalosis**

- เป็นภาวะที่มี HCO_3^- ในเลือดสูง
- ไตรักษาสมดุลโดย
 - กรองเอา HCO_3^- ออกไปกับน้ำกรอง มากกว่า
การคัดหลั่ง H^+ เข้าน้ำกรอง



アロ-アン

のだにゃん