อภินันทนาการ

เอกสารประกอบการสอน

วิชา 303 318 Animal Physiology and Anatomy II

โดย

อาจารย์นายสัตวแพทย์ ดร. ภคนิจ คุปพิทยานันท์

ส.พบ., M.Res., Ph.D. (*Physiology*)

สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำนำ

เอกสารประกอบการสอนนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนวิชา **303 318 Animal Physiology and Anatomy II ส่วน ระบบต่อมไร้ท่อและฮอร์โมน ระบบทางเดินอาหาร และระบบขับถ่ายปัสสาวะ** ให้กับนักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์ชั้นปีที่ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หวังว่าเอกสารนี้จะเป็นประโยชน์ต่อนักศึกษาและผู้สนใจทั่วไป

อ.น.สพ.ดร. ภคนิจ คุปพิทยานันท์

ตุลาคม 2548

เอกสารประกอบการสอน

วิชา 303 318 Animal Physiology and Anatomy II

เรื่อง

ระบบต่อมไร้ท่อและฮอร์โมน

(Endocrine System)

โดย

อาจารย์นายสัตวแพทย์ ดร. ภคนิจ คุปพิทยานันท์

ส.พบ., M.Res., Ph.D. (*Physiology*)

สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำนำ

เอกสารประกอบการสอนนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนวิชา 303 318 Animal Physiology and Anatomy ให้กับนักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์ชั้นปีที่ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หวังว่าเอกสารนี้จะเป็นประโยชน์ต่อนักศึกษาและผู้สนใจทั่วไป

อ.น.สพ.ดร. ภคนิจ คุปพิทยานันท์

ตุลาคม 2548

ระบบต่อมไร้ท่อและฮอร์โมน

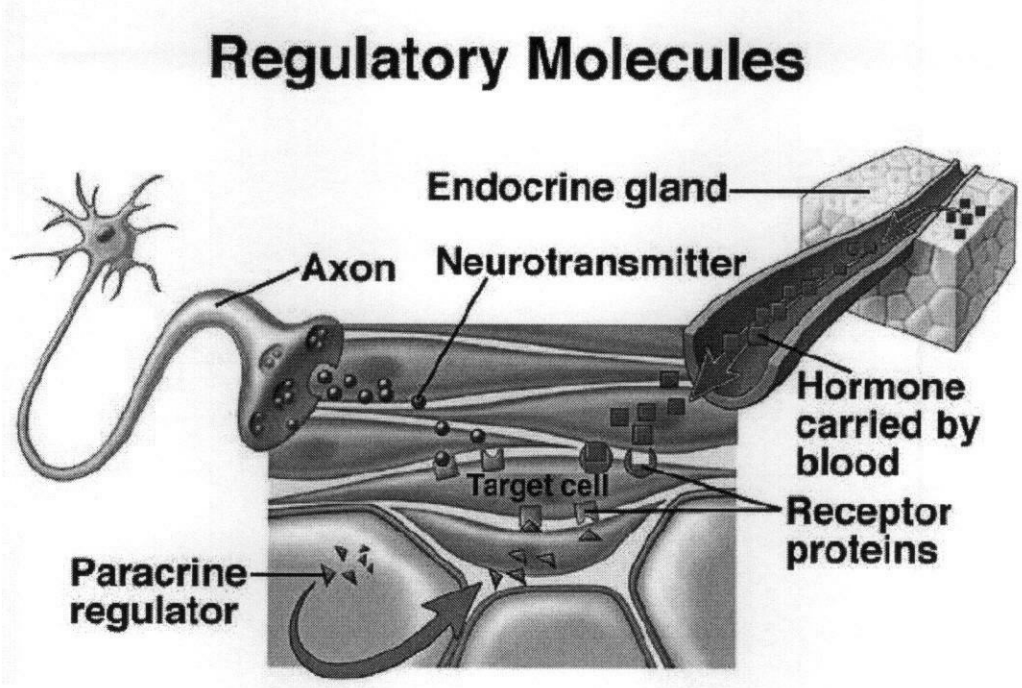
Dr. Pakanit Kupittayanant D.V.M., Ph. D.

เนื้อหาประกอบด้วย

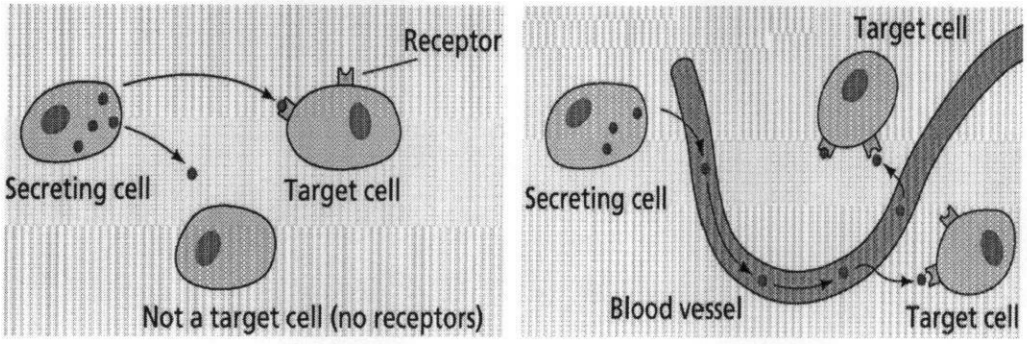
- หลักการของระบบต่อมไร้ท่อ
  - ลักษณะทั่วไปของการทำงานของต่อมไร้ท่อ
  - หน้าที่ของฮอร์โมน
  - ประเภทและคุณสมบัติของฮอร์โมน
  - กลไกการออกฤทธิ์ของฮอร์โมน
  - การวัดระดับฮอร์โมน
  - การควบคุมการสร้างและหลั่งฮอร์โมน
  - ความผิดปกติของต่อมไร้ท่อ
- ฮอร์โมนและการควบคุมการทำงานของระบบต่างๆ
- ฮอร์โมนและการผลิตสัตว์

หลักการของระบบต่อมไร้ท่อ

- **ลักษณะทั่วไปของการทำงานของต่อมไร้ท่อ**
  - เป็นระบบสื่อสารภายในร่างกายทำหน้าที่ควบคุมเชื่อมโยงประสานการทำงานของระบบต่างๆภายในร่างกาย
  - มีลักษณะการทำงานที่ค่อนข้างช้า แต่มีผลการทำงานนาน เนื่องจากการทำงานของอวัยวะบางอย่างไม่สามารถเปลี่ยนแปลงหรือเกิดผลขึ้นได้อย่างฉับพลันทันที ตามที่ร่างกายต้องการ
  - การทำงานของอวัยวะเหล่านี้เกิดขึ้นได้โดยอาศัยสารเคมีที่เรียกว่า “ฮอร์โมน” (hormone) ซึ่งผลิตขึ้นจากต่อมไร้ท่อ
  - ฮอร์โมนเหล่านี้จะถูกนำไปสู่อวัยวะต่างๆทั่วร่างกายโดยอาศัยระบบไหลเวียนเลือด เนื่องจากไม่มีท่อนำออก
  - บางอวัยวะเท่านั้นที่จะตอบสนองต่อฮอร์โมน ซึ่งอวัยวะเหล่านี้เรียกว่า “อวัยวะเป้าหมาย” (target organ) ของแต่ละฮอร์โมน
  - ปกติสารที่เป็นฮอร์โมนจะมีการควบคุมตัวเอง (self regulation) ให้อยู่ในระดับคงที่หรือเปลี่ยนแปรตามความเหมาะสมกับสภาวะต่างๆของร่างกายโดยผลจากการตอบสนองของอวัยวะจะถูกตรวจสอบเพื่อปรับปริมาณการหลั่งฮอร์โมนอีกต่อหนึ่ง หรือบางทีความเข้มข้นของฮอร์โมนในเลือดจะเป็นตัวกำหนดการหลั่งของฮอร์โมนจากต่อมหรือบางกรณีการทำงานของอวัยวะจะถูกวัดจากระบบประสาทซึ่งจะไปควบคุมต่อมไร้ท่ออีกต่อหนึ่ง



รูปที่ 1. Regulatory molecules ในร่างกายของสัตว์



รูปที่ 2 สัมพันธ์ระหว่างเซลล์เป้าหมาย (Target cells) และฮอร์โมน (Hormone)

- **ลักษณะทั่วไปของการทำงานของต่อมไร้ท่อ (ต่อ)**
  - ฮอร์โมนจะถูกสร้างขึ้นตลอดเวลา และเมื่อร่างกายต้องการเพิ่มขึ้น ต่อมจะเพิ่มอัตราการสร้าง และหลั่งฮอร์โมนอย่างมากและรวดเร็ว ฮอร์โมนจะซึมเข้าสู่กระแสเลือดและไปออกฤทธิ์ที่อวัยวะเป้าหมาย
  - ฮอร์โมนจะมีอายุอยู่ชั่วระยะเวลาหนึ่งเมื่อออกฤทธิ์แล้วจะถูกทำลายโดยตับหรือไตหรือทั้งสองแห่ง แล้วสารเมตาบอไลท์จะถูกขับออกทางปัสสาวะ อุจจาระ น้ำดี
  - ส่วนใหญ่ฮอร์โมนที่สร้างขึ้นจากต่อมจะสร้างเป็น prohormone ซึ่งยังไม่มีผลต่อร่างกาย จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างบางอย่างเสียก่อนจึงจะสามารถออกฤทธิ์ที่มีผลต่อร่างกายได้
  - ฮอร์โมนมีความจำเพาะต่อสัตว์แต่ละชนิด คือฮอร์โมนชนิดเดียวกันอาจให้ผลแตกต่างกันระหว่างสัตว์

หน้าที่ของฮอร์โมน

- ควบคุมระบบพลังงานของร่างกาย เมตาบอลิสมของเซลล์
- ควบคุมปริมาณน้ำและเกลือแร่ในร่างกาย
- ควบคุมการเจริญเติบโตพัฒนาการของร่างกายและมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของสัตว์ด้วย
- ควบคุมระบบสืบพันธุ์และต่อมน้ำนม
- ควบคุมระบบทางเดินอาหาร
- มีผลต่อการปรับตัวต่อสิ่งแวดล้อม

ประเภทและคุณสมบัติของฮอร์โมน

- เปปไทด์ฮอร์โมน (peptide hormone: protein hormone)
- สเตียรอยด์ฮอร์โมน (steroid hormone)
- อะมีนฮอร์โมน (amine hormone)
- กลัยโคโปรตีนฮอร์โมน (glycoprotein hormone)
- อื่นๆ

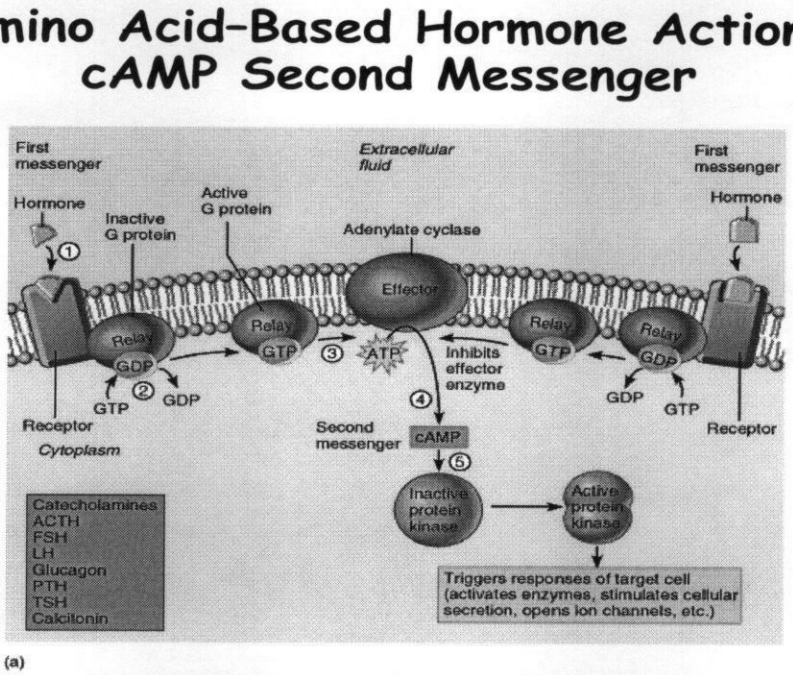
- **เปปไทด์ฮอร์โมน (peptide hormone: protein hormone)**
  - ประกอบด้วยฮอร์โมนซึ่งต่อกันด้วย peptide chain
  - ได้แก่ ฮอร์โมนที่ได้จากไฮโปทาลามัส (hypothalamus), ต่อมพิทูอิทารี่ (pituitary gland), และ พาราไทรอยด์ (parathyroid)
  - สร้างและถูกเก็บไว้ในต่อมในรูปของ granule
  - ถูกขนส่งทางกระแสโลหิต โดยไม่จับกับพลาสม่าโปรตีน
  - ระดับของฮอร์โมนไม่คงที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว
  - มี half life สั้นประมาณ 5-10 นาที
  - ไม่ผ่านเข้าเซลล์อวัยวะเป้าหมาย แต่มี receptor อยู่ที่ plasma membrane ออกฤทธิ์โดยผ่าน c-AMP หรือ แคลเซี่ยมไอออน
  - เป็นฮอร์โมนที่ละลายน้ำได้
- **สเตียรอยด์ฮอร์โมน (steroid hormone)**
  - เป็นฮอร์โมนที่มาจากต่อมหมวกไต (adrenal gland) ไต (kidney) รังไข่ และอัณฑะ (ovary & testes) สังเคราะห์จากสารเริ่มต้นคือ cholesterol
  - ไม่ถูกเก็บไว้ในต่อมที่สร้าง เมื่อสร้างเสร็จแล้วจะถูกหลั่งออกมาทันที
  - ถูกขนส่งทางกระแสโลหิต โดยไปจับแน่นกับโปรตีนอย่างจำเพาะในพลาสม่า
  - ระดับของฮอร์โมนในกระแสเลือดค่อนข้างคงที่
  - มี half life นานกว่าเปปไทด์ฮอร์โมน
  - เข้าไปในเซลล์ได้มี cytoplasmic receptor ออกฤทธิ์ได้โดยไม่ผ่าน c-AMP
  - เป็นฮอร์โมนที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ในไขมันและมีขนาดโมเลกุลใหญ่
- **อะมีนฮอร์โมน (amine hormone)**
  - เป็นฮอร์โมนที่ได้มาจากกรดอะมิโนที่เชื่อมกันโดยตัดเอา carboxyl group ออกได้อะมีน มีขนาดโมเลกุลเล็ก บางชนิดละลายน้ำ
  - ฮอร์โมนกลุ่มนี้ได้แก่ แคททีโคลามีน (cathecholamine) และ ธัยรอกซิน (thyroxine)
  - สร้างและถูกเก็บไว้ในต่อมในรูปของ granule
  - ถูกขนส่งทางกระแสโลหิต โดยบางชนิดกับพลาสม่าโปรตีน เช่น ธัยรอกซิน บางชนิดก็ไม่จับกับกับพลาสม่าโปรตีน เช่น cathecholamine
  - ระดับของฮอร์โมนไม่แน่นอน มีระดับสูงๆต่ำๆอยู่เสมอ

- การออกฤทธิ์บางตัวก็ผ่าน c-AMP บางตัวก็จับ receptor แล้วเข้าไปในนิวเคียสของเซลล์
- เป็นฮอร์โมนที่ละลายในน้ำได้

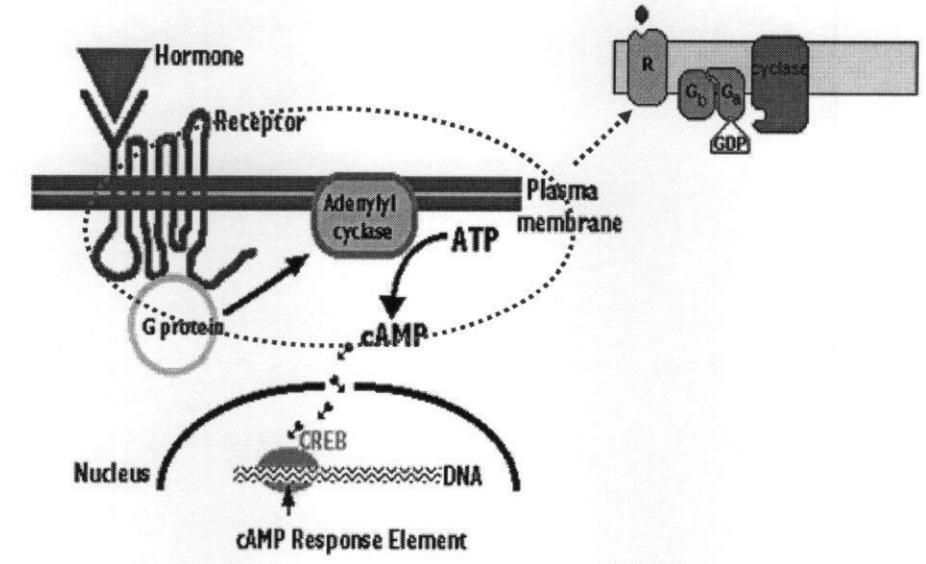
- **กลัยโคโปรตีนฮอร์โมน (glycoprotein hormone)**
  - มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบของโมเลกุล ซึ่งเป็นส่วนที่แสดงบทบาทของฮอร์โมน ฮอร์โมนในกลุ่มนี้ได้แก่ ฮอร์โมนกอนาโดโทรปินส์ (FSH, LH) และ thyrotrophin (TSH)
- **อื่นๆ**
  - พวกที่สร้างมาจากไขมัน (fat derivative) เช่น prostaglandins (PGS) ซึ่งเป็น tissue hormone
  - ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นหรือสร้าง c-AMP ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงในหน้าที่การทำงานของเซลล์โดยมีกลไกการออกฤทธิ์คล้ายพวกเปปไทด์หรืออะมีนฮอร์โมน

กลไกการออกฤทธิ์ของฮอร์โมน

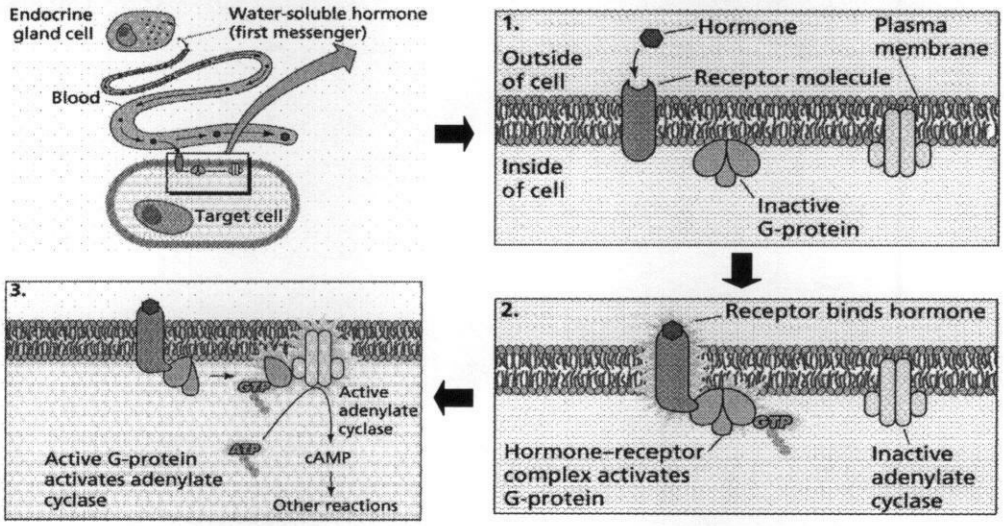
- **พวกเปปไทด์**
  - จะไปจับกับ receptor site บนผนังเซลล์ด้านนอก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางปฏิกิริยาของเอนไซม์บนผนังเซลล์ เผื่อผลิตสารสัญญาณขึ้นภายในเซลล์ คือ c-AMP ซึ่งเป็นสารที่ผลิตจาก ATP จากนั้น c-AMP จะไปกระตุ้นโปรตีนไคเนส (protein kinase) แล้วทำให้เกิด phosphorylation ของเอนไซม์เฉพาะ หรือ regulatory protein ภายในเซลล์ซึ่งจะทำให้เกิดการตอบสนองฤทธิ์ของฮอร์โมนนั้นๆ
  - บางตัวออกฤทธิ์โดยไม่ผ่าน c-AMP แต่การออกฤทธิ์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง permeability ของผนังเซลล์ ทำให้แคลเซียมไอออนสามารถเคลื่อนย้ายเข้าเซลล์ แล้วไปจับกับ calmodulin เกิดเป็น calcium-calmodulin complex ซึ่งจะไปกระตุ้นหรือยับยั้งเอนไซม์ภายในเซลล์ทำให้เกิด biological effect



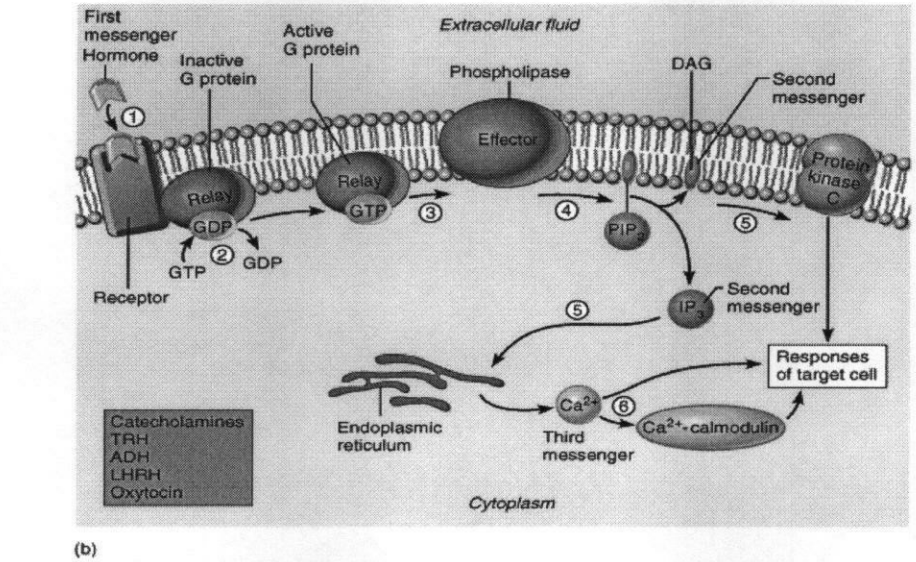
รูปที่ 13 กลไกการออกฤทธิ์ของเปปไทด์ฮอร์โมนผ่านทาง cAMP



รูปที่ 4 กลไกการออกฤทธิ์ของเปปไทด์ฮอร์โมนผ่านทาง cAMP

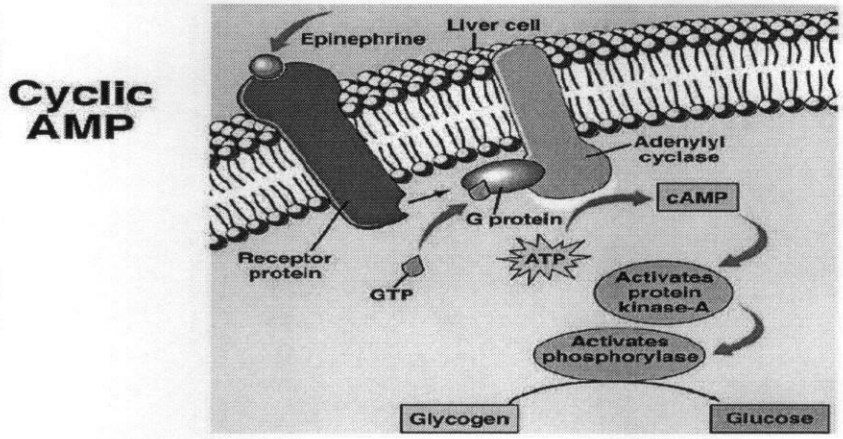


รูปที่ 5 กลไกการออกฤทธิ์ของเปปไทด์ฮอร์โมนผ่านทาง cAMP



รูปที่ 6 กลไกการออกฤทธิ์ของเปปไทด์ฮอร์โมนผ่านทาง PIP-Calcium

Peptide Hormone Action

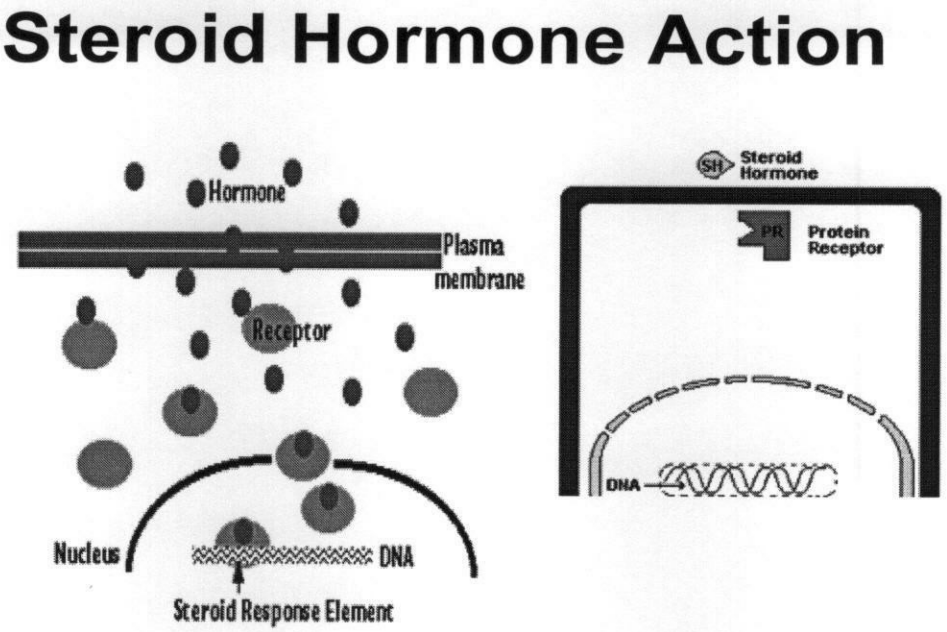


รูปที่ 7 กลไกการออกฤทธิ์ของฮอร์โมน Epinephrine

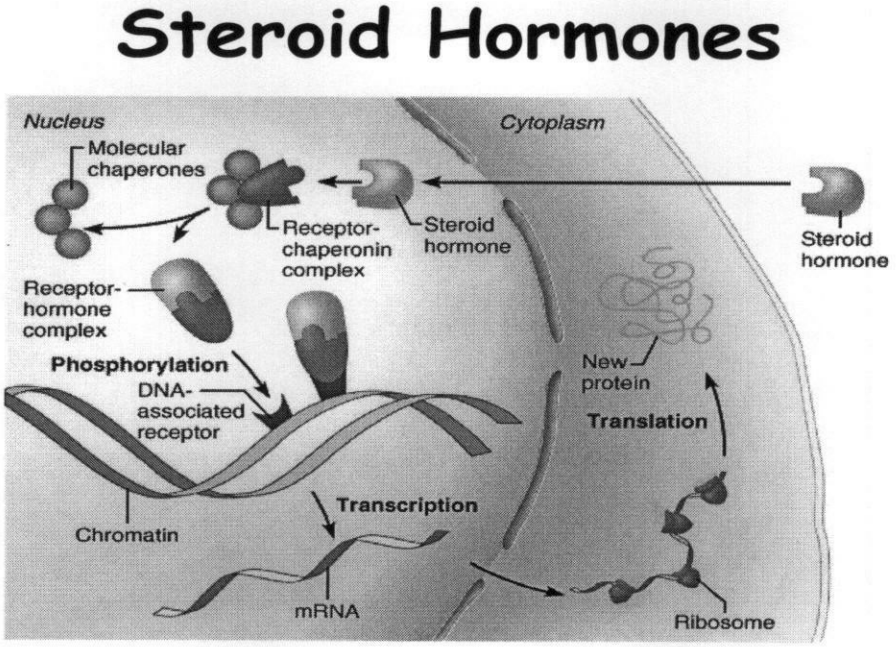
- **พวกสเตียรอยด์ฮอร์โมน**

– ฮอร์โมนจะเข้าสู่เซลล์ไปยังนิวเคียสเพื่อควบคุมการสร้างโปรตีนหรือเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องเพื่อทำหน้าที่ของฮอร์โมนนั้นๆ โดยฮอร์โมนจะไปจับกับ receptor เฉพาะซึ่งจะพบในไซโตพลาสซึม แล้วยึดรวมกันเป็นฮอร์โมน receptor complex เพื่อเข้าไปยังนิวเคียสแล้วกระตุ้นให้เกิด transcription ของยีนส์ที่นิวเคียสทำให้สร้าง m-RNA แล้วจะนำเข้าไปในไซโตพลาสซึม กระตุ้นการสร้างโปรตีน ซึ่งจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงหน้าที่ของเซลล์นั้นๆและปรากฏผลของฮอร์โมนนั้นๆ

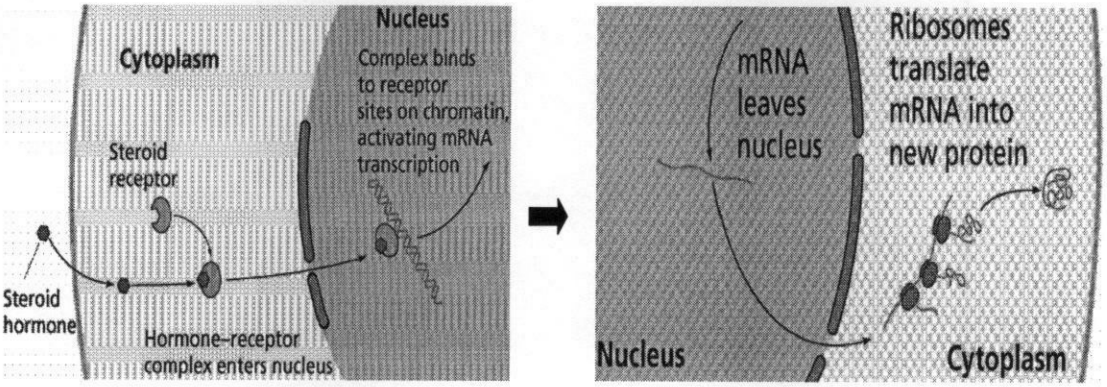
– **ตัวอย่างเช่น ธัยรอยด์ฮอร์โมน** โดยฮอร์โมนจะจับกับ receptor ในไซโตพลาสซึม แล้วไปที่ nuclear chromatin กระตุ้นการสร้างโปรตีน ซึ่งโปรตีนจะแสดงบทบาทของฮอร์โมนต่อร่างกาย



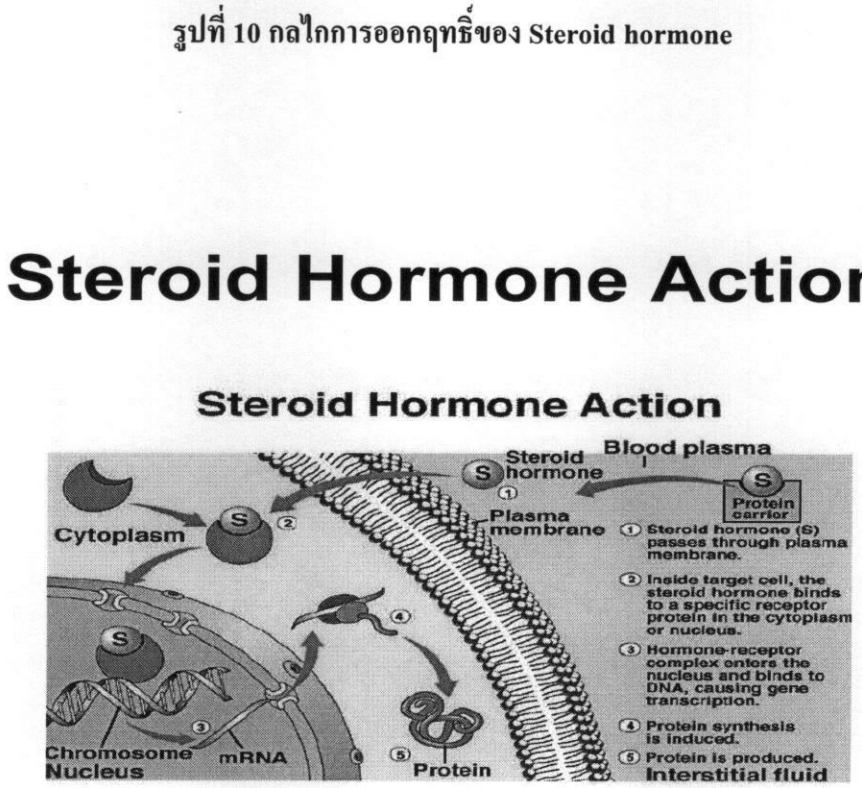
รูปที่ 8 กลไกการออกฤทธิ์ของ Steroid hormone



รูปที่ 9 กลไกการออกฤทธิ์ของ Steroid hormone



รูปที่ 10 กลไกการออกฤทธิ์ของ Steroid hormone



รูปที่ 11 กลไกการออกฤทธิ์ของ Steroid hormone

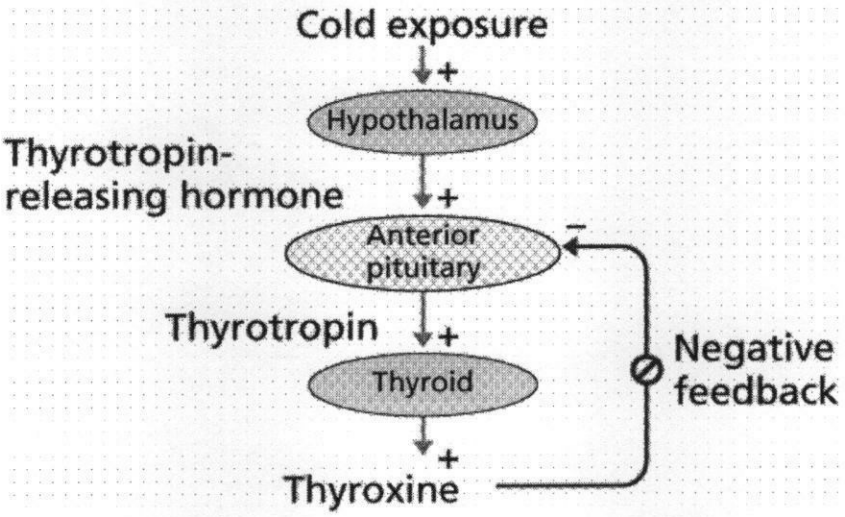
ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การวัดระดับฮอร์โมน

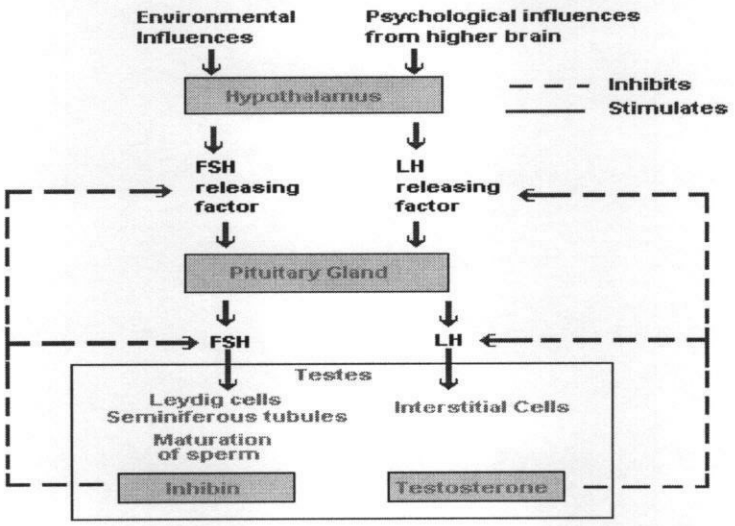
- Radioimmunoassay (RIA) ใช้วัดระดับฮอร์โมนได้เกือบทุกชนิดซึ่งมีความไวละเอียด สะดวก และเป็นวิธีเฉพาะเจาะจง จึงเป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง
- วิธี Bioassays โดยฉีดฮอร์โมนเข้าร่างกาย และดูการตอบสนองของอวัยวะเป้าหมาย ซึ่งได้ผลไม่ชัดเจน
- Elisa โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยา antigen-antibody complex และการเปลี่ยนสีของสารโดยการวัดเฉลี่ยค่าการดูดกลืนแสงในถาดหลุม แล้วนำมาคำนวณหาเป็นค่า antibody titer

การควบคุมการสร้างและหลั่งฮอร์โมน

- **Feedback** คือการที่อวัยวะเป้าหมายสร้างสารขึ้นมากระตุ้นหรือยับยั้งการทำงานของต่อมไร้ท่อให้หลั่งฮอร์โมนมากขึ้นหรือน้อยลง แบ่งได้เป็น
  - **Negative feedback** โดยทางตรง เช่นการที่ฮอร์โมนหลั่งออกมามากขึ้นจะมากระตุ้นหรือยับยั้งการหลั่งของตัวเองที่ต่อมไร้ท่อโดยตรง หรือโดยทางอ้อม เช่นการหลั่ง ATCH จากส่วนหน้าของต่อมใต้สมองจะกระตุ้นให้ต่อมหมวกไตสร้างคอร์ติซอล เมื่อระดับคอร์ติซอลสูงขึ้นก็จะไปยับยั้งการสร้าง ATCH
  - **Positive feedback** มีลักษณะการทำงานเหมือน negative feedback แต่จะไปกระตุ้นต่อมไร้ท่อแทนการยับยั้ง เช่นการที่ฮอร์โมนหลั่งออกมาจากต่อม จะไปกระตุ้นให้ต่อมไร้ท่อให้หลั่งฮอร์โมนเพิ่มขึ้น เช่น positive feedback ของเอสโตรเจนต่อฮอร์โมนโกนาโดโทปินส์ทำให้เกิด LH peak และการตกไข่

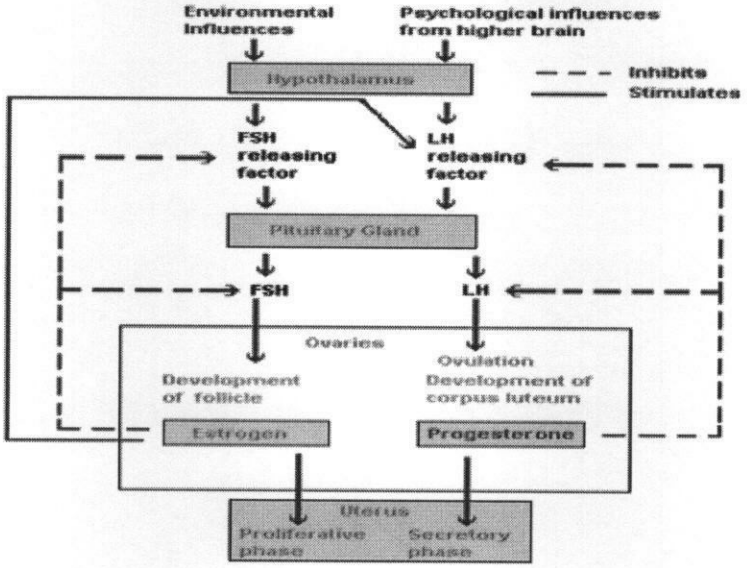


รูปที่ 12 กลไกการยับยั้งการสร้างและหลั่งฮอร์โมนแบบย้อนกลับ (Negative feedback control)



รูปที่ 13 กลไกการควบคุมการสร้างและการหลั่งฮอร์โมนที่เกี่ยวข้องกับระบบสืบพันธุ์ในสัตว์เพศผู้แบบย้อนกลับ (Feedback)

Female Reproductive Hormone Feedback



รูปที่ 14 กลไกการสร้างและหลั่งฮอร์โมนที่เกี่ยวข้องกับระบบสืบพันธุ์ในสัตว์เพศเมียแบบย้อนกลับ (Feedback)

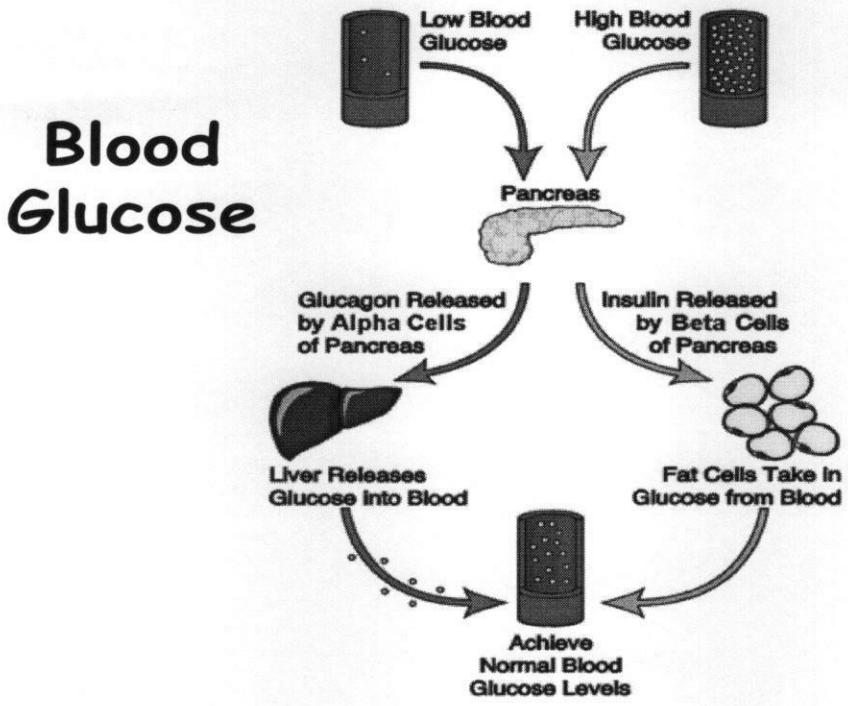
- **การควบคุมทางประสาท**

  – โดยทางตรง ได้แก่ต่อมที่เจริญมาจากเนื้อเยื่อของเซลล์ประสาท จะถูกควบคุมโดยระบบประสาทส่วนกลางโดยมีเส้นใยประสาท (nerve fiber) ไปควบคุมต่อมไร้ท่อ เช่นเมื่อถูกกระตุ้นโดยระบบประสาทจะมี nerve impulse ไปที่ต่อมทำให้มีการหลั่งฮอร์โมนทันที ได้แก่ต่อมใต้สมองส่วนหลัง และต่อมหมวกไตส่วนใน

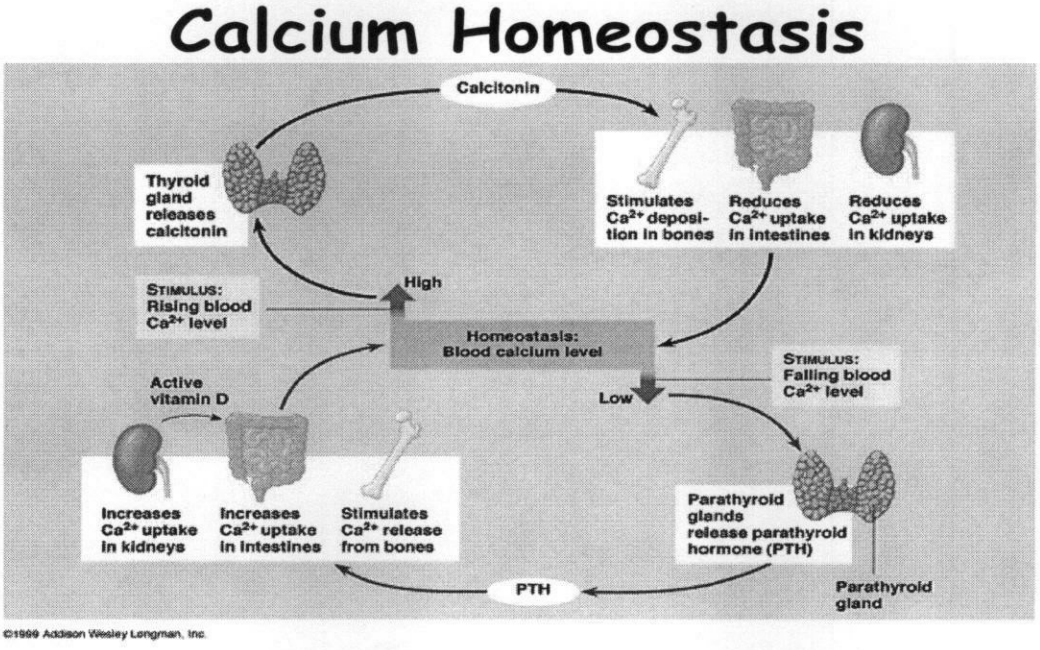
  – โดยทางอ้อม โดยเซลล์ประสาทจะสร้างสารเคมีที่เรียกว่า neuroendocrine hormone (neurohormone) ได้แก่พวก releasing factor และ inhibiting factor ซึ่งได้จากไฮโปธาลามัส แล้วเก็บอยู่ตามเส้นใยประสาทและจะถูกปล่อยเข้าสู่กระแสโลหิต เมื่อมีการกระตุ้นกระแสประสาทจากส่วนสมองที่เกี่ยวข้องไปควบคุมการหลั่งฮอร์โมนของต่อมไร้ท่อ เช่นการควบคุมการ

  – หลั่งฮอร์โมนจากต่อมใต้สมองส่วนหน้า

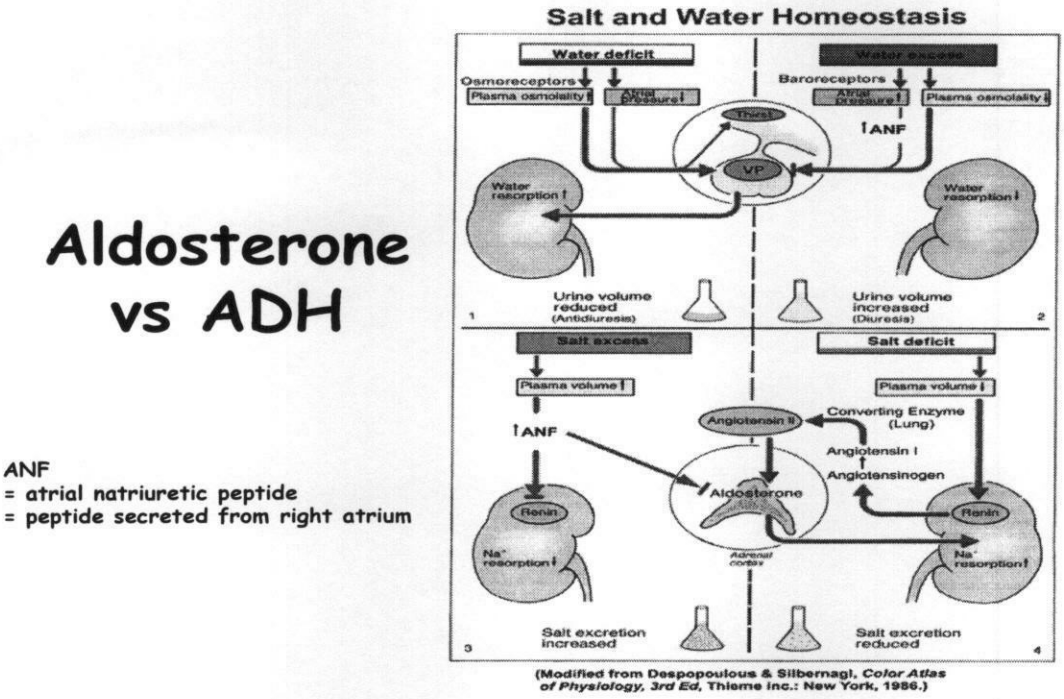
  – **สารอื่นๆในเลือด** ที่ไม่ใช่ฮอร์โมนก็สามารถควบคุมการหลั่งฮอร์โมนได้ เช่นระดับน้ำตาลในเลือดควบคุมการหลั่งอินซูลิน ระดับแคลเซียมควบคุมการหลั่งพาราฮอร์โมนและปริมาณความเข้มข้นของเกลือแร่ในเลือดควบคุมการหลั่งอัลโดสเตอโรน และ ADH



รูปที่ 15 การควบคุมการสร้างและหลั่งฮอร์โมนของตับอ่อนโดยระดับของน้ำตาลกลูโคสในกระแสเลือด



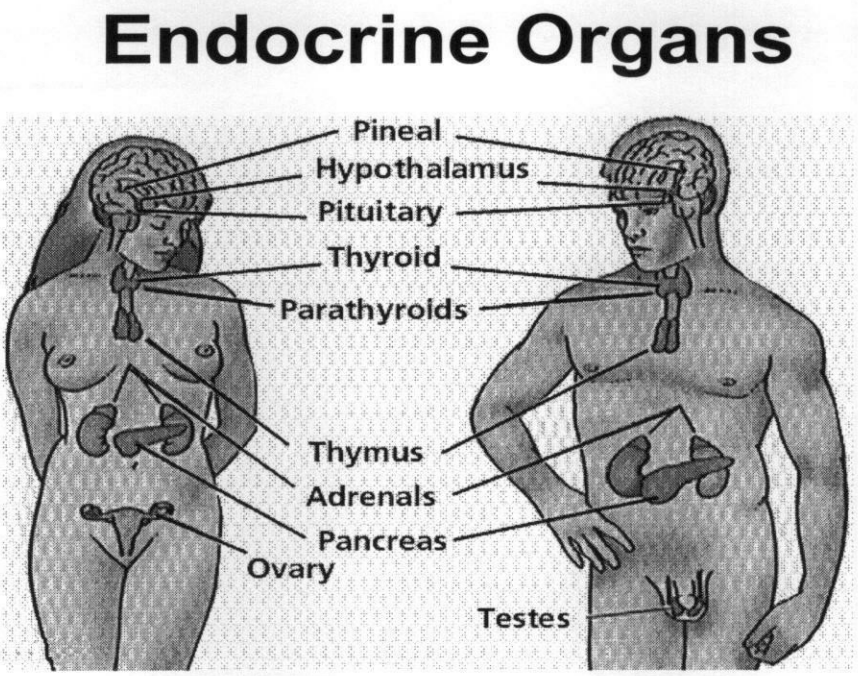
รูปที่ 16 การควบคุมการสร้างและการหลั่งฮอร์โมนจากต่อมไทรอยด์และต่อมพาราไทรอยด์โดยระดับของแคลเซียมในกระแสเลือด



รูปที่ 17 การควบคุมการสร้างและหลั่งฮอร์โมน Aldosterone และ ADH โดยระดับของเกลือแร่ในกระแสเลือด

ความผิดปกติของต่อมไร้ท่อ

- **กรรมพันธุ์** ได้แก่ ความบกพร่องของเอนไซม์ และความผิดปกติอื่นๆที่มีผลทำให้ระดับฮอร์โมนน้อยหรือขาดหรือการสังเคราะห์มากหรือน้อยเกินไป หรือเกิดจากความผิดปกติเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงระดับโปรตีนที่มาจับกับฮอร์โมน (hormone binding protein) หรือความผิดปกติจาก receptor เป็นผลให้การออกฤทธิ์ของฮอร์โมนผิดปกติ
- **การหลั่งฮอร์โมนผิดปกติ**
  - การทำงานของฮอร์โมนต่ำกว่าปกติ(hypo...) ส่วนใหญ่มีสาเหตุจาก autoimmune mechanism ซึ่งขบวนการนี้ทำให้เกิดการทำลายต่อมไร้ท่อ
  - การทำงานของฮอร์โมนมากกว่าปกติ(hyper...) มักเกิดจากเนื้องอก (hyperplasia, adenoma or carcinoma) ของต่อมไร้ท่อ
- **Hormone resistance** เป็นความผิดปกติของต่อมไร้ท่อ receptor และร่างกายไม่ตอบสนองต่อฤทธิ์ของฮอร์โมน



รูปที่ 18 ตำแหน่งของต่อมไร้ท่อ (Endocrine gland) ต่าง ๆ ในร่างกายมนุษย์

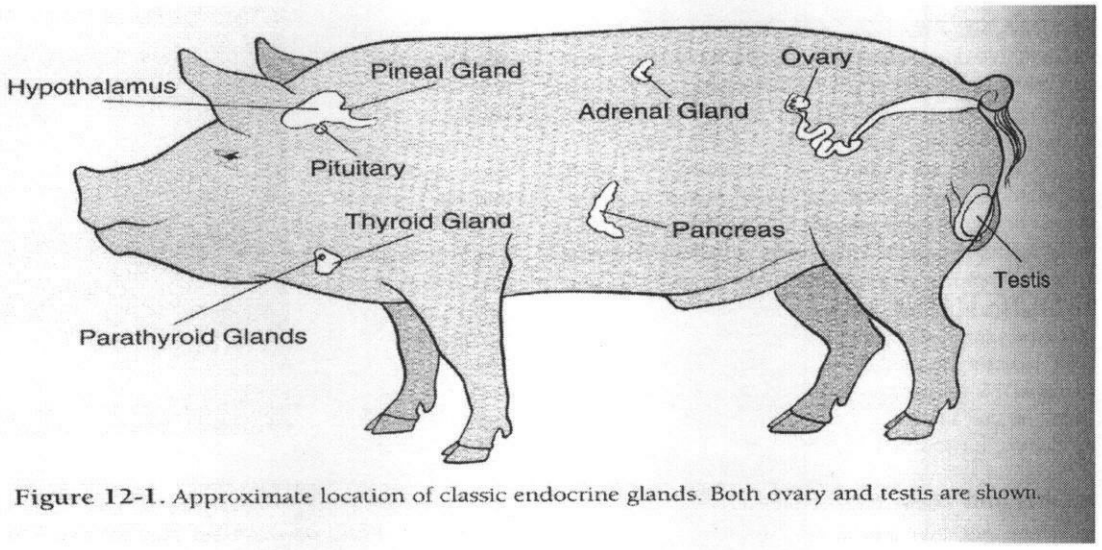


Figure 12-1. Approximate location of classic endocrine glands. Both ovary and testis are shown.

รูปที่ 19 ตำแหน่งของต่อมไร้ท่อ (Endocrine gland) ต่าง ๆ ในร่างกายของสัตว์ (สุกร)

ฮอร์โมน : แหล่งที่สร้าง, อวัยวะเป้าหมายและหน้าที่

(Hormones: Sources, Targets and Functions)

Source	Hormone	Target	Physiologic Effect
Anterior pituitary	Follicle-stimulating hormone (FSH)	Ovary and Testes	Growth of ovarian follicles or seminiferous tubules
Anterior pituitary	Luteinizing hormone (LH)	Ovary and Testes	Production of estrogen and progesterone or testosterone
Anterior pituitary	Prolactin (LTH)	Ovary and Mammary	Stimulate milk production in breast maintain secretion of estrogen and progesterone by ovary
Anterior pituitary	Thyroid stimulating hormone (TSH)	Thyroid	Stimulates secretion of thyroid hormones
Anterior pituitary	Adrenocorticotropic hormone (ACTH)	Adrenal cortex	Stimulates secretion of adrenal cortex hormones
Anterior pituitary	Growth hormone (GH)	General	Stimulates growth
Anterior pituitary	Melanocyte-stimulating hormone (MSH)	Melanocytes	Stimulates dispersal of pigment in chromatophores
Hypothalamus via posterior pituitary	Oxytocin	Uterus and Mammary	Stimulates contraction and secretion of milk
Hypothalamus via posterior pituitary	Antidiuretic hormone (ADH)	Kidney	Stimulates reabsorption of water
Thyroid gland	Thyroxin and triodothyroxin	General	Stimulates metabolism, growth and development
Thyroid gland	Calcitonin	Bone	Lowers blood calcium level by inhibiting bone breakdown

ฮอร์โมน : แหล่งที่สร้าง, อวัยวะเป้าหมายและหน้าที่ (ต่อ)

(Hormones: Sources, Targets and Functions)

Source	Hormone	Target	Physiologic Effect
Parathyroid gland	Parathyroid hormone	Bone, kidney digestive tract	Increases blood calcium by stimulating bone breakdown
Adrenal cortex	Mineralocorticoids (aldosterone)	Kidney	Maintain sodium and phosphate balance
Adrenal cortex	Glucoocorticoids (cortisol)	General	Raise blood-glucose level adapt to long-term stress
Adrenal cortex	Dehydroepiandrosterone (DHEA)		Stimulate sex drive induce labor
Adrenal medulla	Epinephrine (adrenalin)	Muscle, liver	Stimulates glucose release short term cope with stress
Adrenal medulla	Norepinephrine	Blood vessels	Constricts blood vessels increase heart rate
Pineal gland	Melatonin	Gonads, pigment cells other cells	Control biorhythms influence reproduction
Pancreas alpha cells	Glucagon	Liver fatty tissue	Raise blood glucose concentration stimulate gluconeogenesis
Pancreas beta cells	Insulin	General	Lower blood glucose concentration stimulate glycogen synthesis
Ovary	Estrogen estradiol	General uterus	Develop/maintain female characteristics stimulate growth of uterine lining
Ovary	Progestrogen	Uterus breast	Stimulate development of uterine lining
Ovary and placenta	Relaxin	Pelvic ligaments	Relaxes pelvic ligaments
Placenta	Chorionic gonadotropin	Anterior pituitary	Stimulates release of FSH and LH

ฮอร์โมน : แหล่งที่สร้าง, อวัยวะเป้าหมายและหน้าที่ (ต่อ)

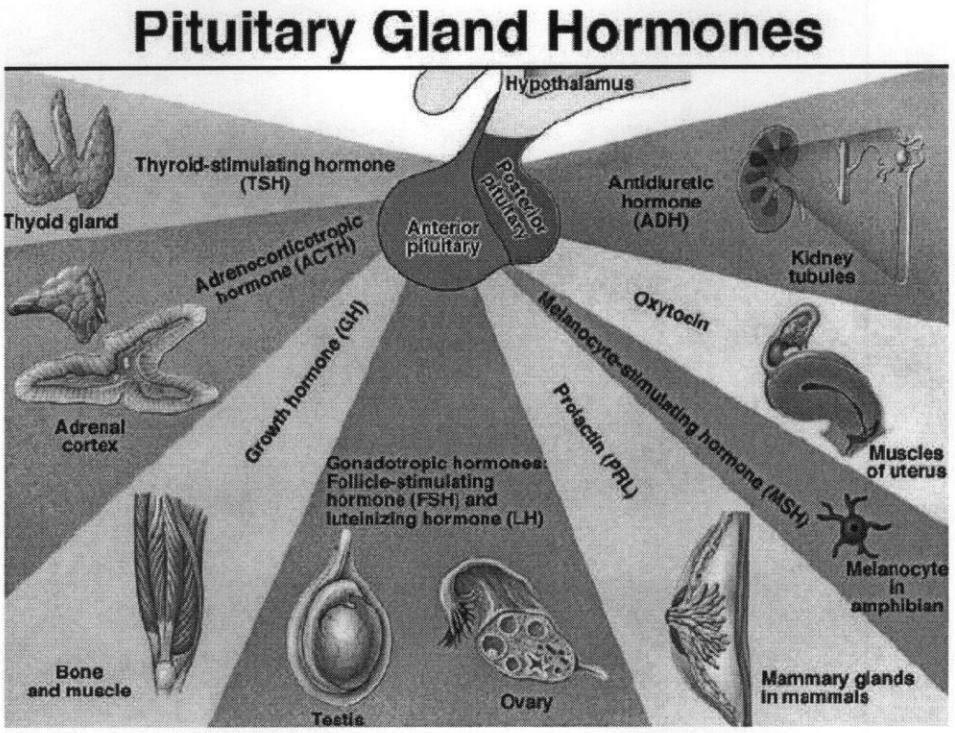
(Hormones: Sources, Targets and Functions)

Source	Hormone	Target	Physiologic Effect
Testes	Testosterone	General and reproductive structures	Develops and maintains male sex characteristics promotes spermatogenesis
Testes	Inhibin	Anterior lobe of pituitary	Inhibits FSH release
Testes	Testosterone	General and reproductive structures	Develops and maintains male sex characteristics promotes spermatogenesis
Duodenal mucosa	Secretin	Pancreas	Stimulates secretion of pancreatic juice
Duodenal mucosa	Cholecystokinin	Gallbladder	Stimulates release of bile by gallbladder

ต่อมใต้สมอง

(Pituitary Gland)

- **ต่อมใต้สมองส่วนหน้า (Anterior Pituitary)**
- **ต่อมใต้สมองส่วนหลัง (Posterior Pituitary)**



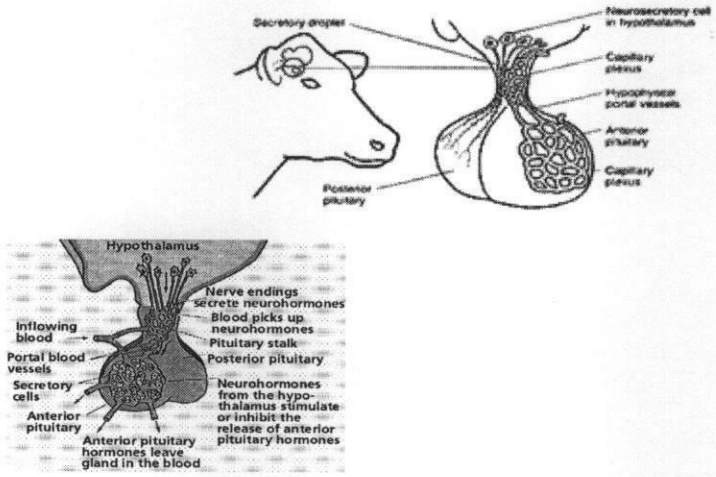
รูปที่ 20 ฮอร์โมนที่สร้างมาจากต่อมใต้สมองและอวัยวะเป้าหมาย

ต่อมใต้สมองส่วนหน้า

(Anterior Pituitary)

- ต่อมใต้สมองส่วนหน้าถูกควบคุมโดย releasing hormone หรือ inhibiting hormone ซึ่งถูกสังเคราะห์โดยเซลล์ประสาทใน hypothalamus
- สารเหล่านี้จะถูกปล่อยเข้าสู่กระแสเลือดฝอยที่อยู่ในส่วนที่อยู่ในส่วน median eminence ของสมองและถูกพามายังต่อมใต้สมองทางหลอดเลือด hypophyseal portal vessels ฮอร์โมนเหล่านี้จะมีผลต่อการหลั่งของฮอร์โมนจากต่อมใต้สมองส่วนหน้า

Relationship between the hypothalamus and the pituitary gland

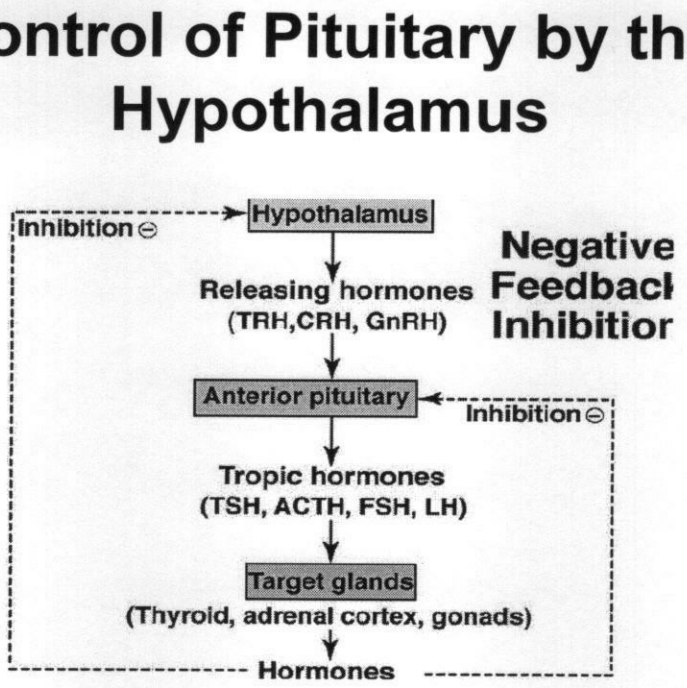


รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างไฮโปทาลามัส (Hypothalamus) และต่อมใต้สมอง (Pituitary gland)

การควบคุมการทำงานของต่อมใต้สมองส่วนหน้าโดยฮอร์โมนจากไฮโปทาลามัส

(Control of Anterior Pituitary Hormones by the Hypothalamic Hormones)

Releasing Hormone (RH)		Inhibiting Hormones (IH)	
Corticotropin RH	→ ↑ ATCH	Prolactin IH	→↓ Prolactin
Thyrotropin RH	→ ↑ TSH	Melanocyte Hormone IH	→↓ MSH
Luteinizing RH	→ ↑ LH	Growth Hormone IH	→↓ GH
Follicle Stimulating RH	→ ↑ FSH		
Growth RH	→ ↑ GH		
Melanocyte Hormone RH	→ ↑ MSH		



รูปที่ 22 การควบคุมการทำงานของต่อมใต้สมองโดยไฮโปทาลามัส

ATCH(*Adrenocorticotropin*)

- **ผลของ ATCH**
  - มีผลกระตุ้นการเจริญเติบโต สังเคราะห์ และหลั่งฮอร์โมน จากเปลือกต่อมหมวกไต (adrenal cortex)
  - มีผลต่อการสลายตัวของต่อม Thymus
  - กระตุ้นการกระจายตัวของ melanin ที่ผิวหนัง
  - กระตุ้นการสลายตัวของไขมัน และกระตุ้นการส่งผ่านกรดอะมิโนและกลูโคสที่กล้ามเนื้อ

MSH

- **บทบาทในการควบคุมสีผิวโดย**
  - ในสัตว์ชั้นต่ำ สัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำ ที่ผิวหนังจะมีเซลล์ melanophores สร้าง melanin pigment ฮอร์โมน MSH จะทำให้ melanin กระจายทั่วเซลล์ melanophores ทำให้สีผิวคล้ำ

- พวกสัตว์ชั้นสูง นก สัตว์เลี้ยงลูกด้วยน้ำนม MSH จะเป็นตัวกระตุ้น melanocytes เพื่อให้สร้าง melanin pigment เมื่อ pigment กระจายจะทำให้ผิวสีเข้ม การกระจายตัวของ pigment ขึ้นกับแสงสว่าง

PRL(*Prolactin*)

- PRL จะมีระดับสูงตอนใกล้คลอด
- มีบทบาท
  - กระตุ้นการเจริญเติบโตของต่อมน้ำนมเพื่อให้สร้างและหลั่งน้ำนมในการเลี้ยงลูกอ่อน
  - ทำให้เกิด maternal behavior
  - ฮอร์โมนนี้ถูกกระตุ้นโดยการดูดนมของลูกสัตว์
  - ฮอร์โมนนี้ทำหน้าที่เพิ่มการรักษา corpus luteum ให้คงอยู่ เพื่อให้มีการหลั่งโปรเจสเตอโรนในระยะแรกของการตั้งท้อง
  - ถ้าระดับของ PRL ต่ำหรือสูงผิดปกติจะยับยั้งการออกฤทธิ์ของ LH ต่อ gonads

Growth Hormone

- ในสัตว์แต่ละชนิดมีโครงสร้างต่างกันไป และ GH ของสัตว์แต่ละพวกจะมีฤทธิ์เฉพาะกับสัตว์พวกนั้นเท่านั้น
- ผลของ GH
  - เป็น anabolic hormone กระตุ้นให้เซลล์เพิ่มการสังเคราะห์โปรตีน โดยเร่งการส่งผ่านกรดอะมิโนเข้าสู่เซลล์ และเปลี่ยนไปเป็นโปรตีน ทำให้ร่างกายเจริญเติบโต ทำให้เกิด positive nitrogen balance และลดการสลายโปรตีน
  - มีผลต่อการเจริญเติบโตของกระดูก เพิ่มการทำงานของเซลล์สร้างกระดูก
  - ลดการสะสมของไขมัน ส่งเสริมการเผาผลาญ (lipolysis) ในภาวะอดอาหาร
  - ลดการใช้คาร์โบไฮเดรต โดยเปลี่ยนไปใช้ไขมันเป็นแหล่งสร้างพลังงานแทน
  - รักษาระดับน้ำตาลในเลือดให้คงที่ เพิ่มอัตราการเปลี่ยนกลัยโคเจนในตับเป็นกลูโคสและขับออกมาในกระแสโลหิต ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดสูง

FSH & LH

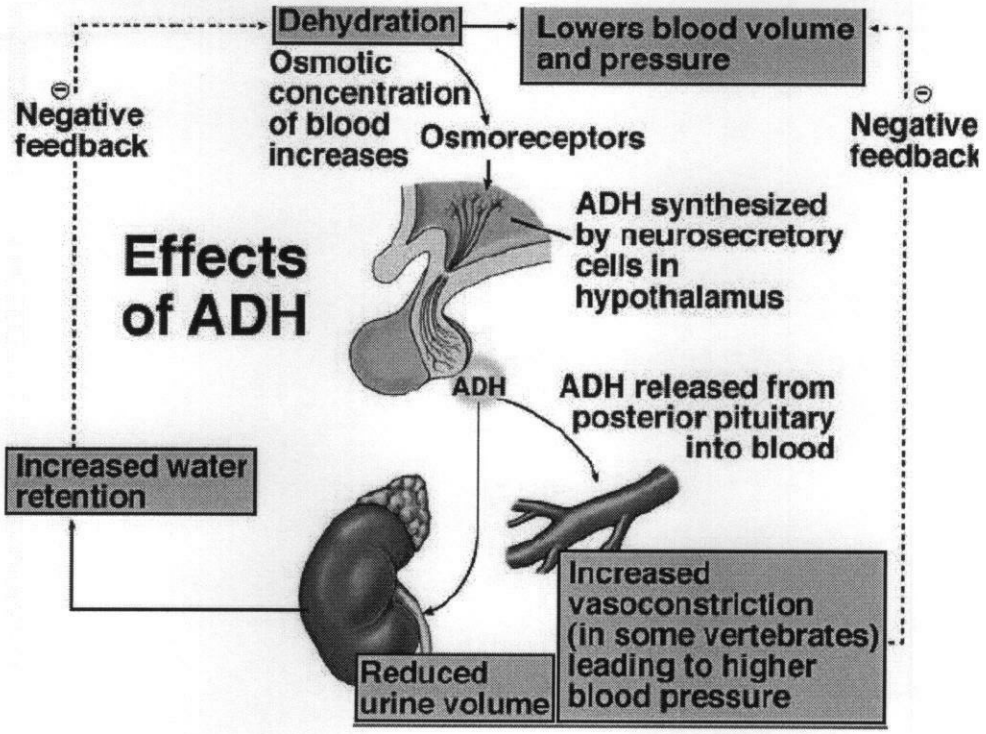
- **มีผลต่อต่อมเพศ รังไข่ และอัณฑะ**
- **FSH มีหน้าที่**

- กระตุ้นควบคุมการเจริญเติบโตของรังไข่, ไข่ และสร้างฮอร์โมนเพศของรังไข่ (estrogen) ในเพศเมีย
- เกี่ยวกับสร้างเชื้ออสุจิในเพศผู้ กระตุ้นการเจริญเติบโตของ seminiferous tubules

- **LH มีหน้าที่**
  - กระตุ้นการเจริญเติบโตของไข่หลังจาก ถูกกระตุ้นด้วย FSH และมีการตก
  - ไข่ (ovulation)
  - ทำให้เกิด corpus luteum ในรังไข่ซึ่งจะทำหน้าที่สร้างฮอร์โมนโปรเจสเตอโรน
  - เตรียมต่อมน้ำนมสำหรับการหลั่งน้ำนม
  - ในเพศผู้ เรียก LH ว่า ICSH (interstitial cell stimulating hormone) ทำหน้าที่กระตุ้น Leydig's cell ในอัณฑะให้เจริญและสร้างฮอร์โมน testosterone

ต่อมใต้สมองส่วนหลัง
(Posterior Pituitary)

- หลั่งฮอร์โมน 2 ชนิด
  - ออกซิโทซิน (Oxytocin)
  - วาโสเพรสซิน (Vasopressin หรือ antidiuretic hormone ADH)
- ฮอร์โมนทั้งสองชนิดสร้างจาก hypothalamus โดยจะจับกับ carrier protein ที่เรียกว่า neurophysin อยู่ใน granule แล้วไหลไปตามใยประสาท (axon) ของ hypothalamohypophyseal tract มารวมอยู่ใน median eminence ในต่อมใต้สมองส่วนหลังแล้วไหลเข้าสู่กระแสโลหิตเมื่อร่างกายต้องการ
- **Oxytocin**
  - ช่วยในการคลอดลูก โดยกระตุ้นการบีบตัวของเซลล์กล้ามเนื้อของมดลูก
  - ช่วยในการหลั่งน้ำนม เมื่อลูกสัตว์ดูดนมปลายประสาทที่หัวนมถูกกระตุ้นและส่งสัญญาณไปยัง hypothalamus (เกิด neuroendocrine reflex) ให้หลั่ง oxytocin ออกมา
  - ช่วยเร่งการขนส่งเชื้ออสุจิเข้าสู่ช่องคลอด
- **ADH (*Antidiuretic hormone*)**
  - มีหน้าที่ควบคุมสมดุลย์ของน้ำในร่างกาย
  - กระตุ้นการดูดกลับของน้ำที่ท่อไต
  - การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและปริมาณน้ำในร่างกายและความดันเลือดที่เพิ่มขึ้นมีผลกระตุ้นการหลั่ง ADH



รูปที่ 23 ผลของ Antidiuretic hormone (ADH) ต่ออวัยวะต่าง ๆ ในร่างกาย

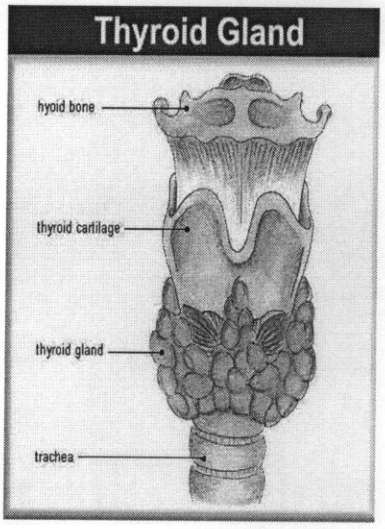
Other Endocrine Glands

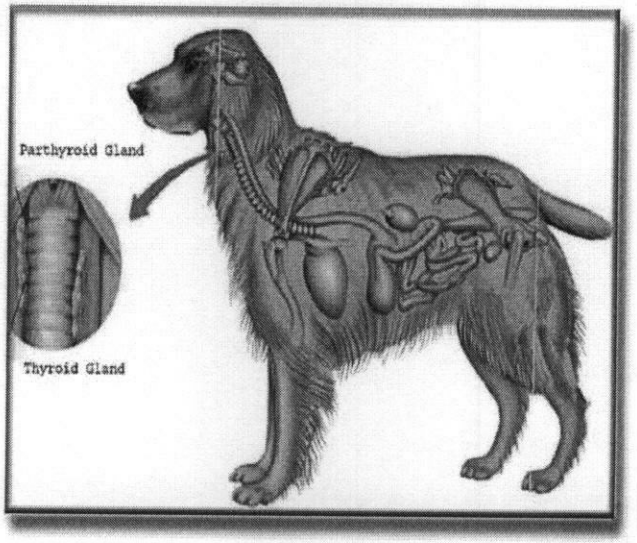
- Thyroid Gland
- Adrenal Gland
- Pancreas
- Parathyroid Gland

Thyroid Glands &Thyroxine

- สร้างฮอร์โมนชื่อ Thyroxine
- มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของร่างกายทั่วไป การสร้างกล้ามเนื้อ การเคลื่อนไหว ช่วยในการจัดเรียงตัวของเซลล์ในอวัยวะต่างๆ กระตุ้นให้เซลล์สร้างโปรตีนมากขึ้น ทำให้ร่างกายสะสมไนโตรเจน ถ้ามีฮอร์โมนมากเกินจะกระตุ้นให้มีการสลายโปรตีน
- มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของกระดูก และฟัน ถ้าขาดจะแคระแกรน

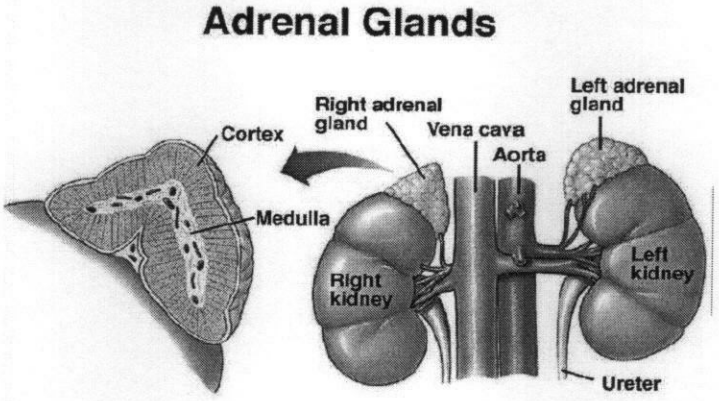
- มีบทบาทเป็น calorigenic action ควบคุมอัตราการเผาผลาญสารอาหารต่างๆในร่างกาย การผลิตความร้อนและใช้พลังงานให้เกิดความอบอุ่นแก่ร่างกาย ทำให้ basal metabolic rate (BMR) เพิ่มสูงขึ้นและกระตุ้นการใช้ออกซิเจน (oxygen consumption)
- มีผลกระตุ้นคาร์โบไฮเดรตเมตาบอลิสม กระตุ้นการสร้างกลูโคส (gluconeogenesis) การดูดซึมน้ำตาลกลูโคส เพื่อเพิ่มระดับกลูโคสในเลือดเพื่อใช้เป็นพลังงานเร่งขบวนการสลาย กลัยโคเจนเป็นกลูโคส (glycogenesis)
- ลดการสร้างไขมันในเลือด เพิ่มการแตกสลายของไขมัน (lipolysis) จากเนื้อเยื่อไขมันและเซลล์อื่นๆเพิ่มขึ้น ทำให้มีกรดไขมันอิสระในกระแสโลหิตและเซลล์ต่างๆนำไปใช้พลังงานได้มากขึ้น
- มีผลต่อการทำงานของระบบประสาท
- มีความสำคัญต่อระบบสืบพันธุ์และการผลิตน้ำนม และมีผลต่อการหลั่ง(กระตุ้น)ฮอร์โมน corticosteroid





รูปที่ 24 ต่อมไทรอยด์ (Thyroid gland) ในสัตว์

Adrenal Glands & Hormones



รูปที่ 25 ต่อมหมวกไต (Adrenal gland)

- **ต่อมหมวกไตส่วนนอก (ส่วนเปลือกของต่อมหมวกไต)**
  - **แบ่งออกได้เป็น 3 ชั้น**

    • ชั้นนอกสุด (zona glomerulosa) สร้างและหลั่งฮอร์โมน minerocorticoid ได้แก่ aldosterone ทำหน้าที่ควบคุมสมดุลย์ของน้ำและเกลือแร่ในร่างกาย

    • ชั้นกลาง (zona fasciculata) สร้างและหลั่งฮอร์โมน glucocorticoid ได้แก่ คอร์ติซอล (cortisol) คอร์ติโซน (cotisone) และ คอร์ติโคสเตอโรน (corticosterone) ทำหน้าที่ควบคุมเมตาบอลิสมของโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ทำให้ร่างกายทนต่อความเครียดได้ดี มีผลเป็น permissive effects ทำให้ฮอร์โมนต่างๆของร่างกายทำงานออกฤทธิ์ต่อเป้าหมายได้ดีขึ้น มีฤทธิ์ต่อต้านการอักเสบและภูมิแพ้ จึงใช้เป็นยารักษาการอักเสบได้แต่การใช้ยามากๆ จะทำให้จำนวนเม็ดเลือดขาวลดลงกดการสร้างภูมิคุ้มกัน

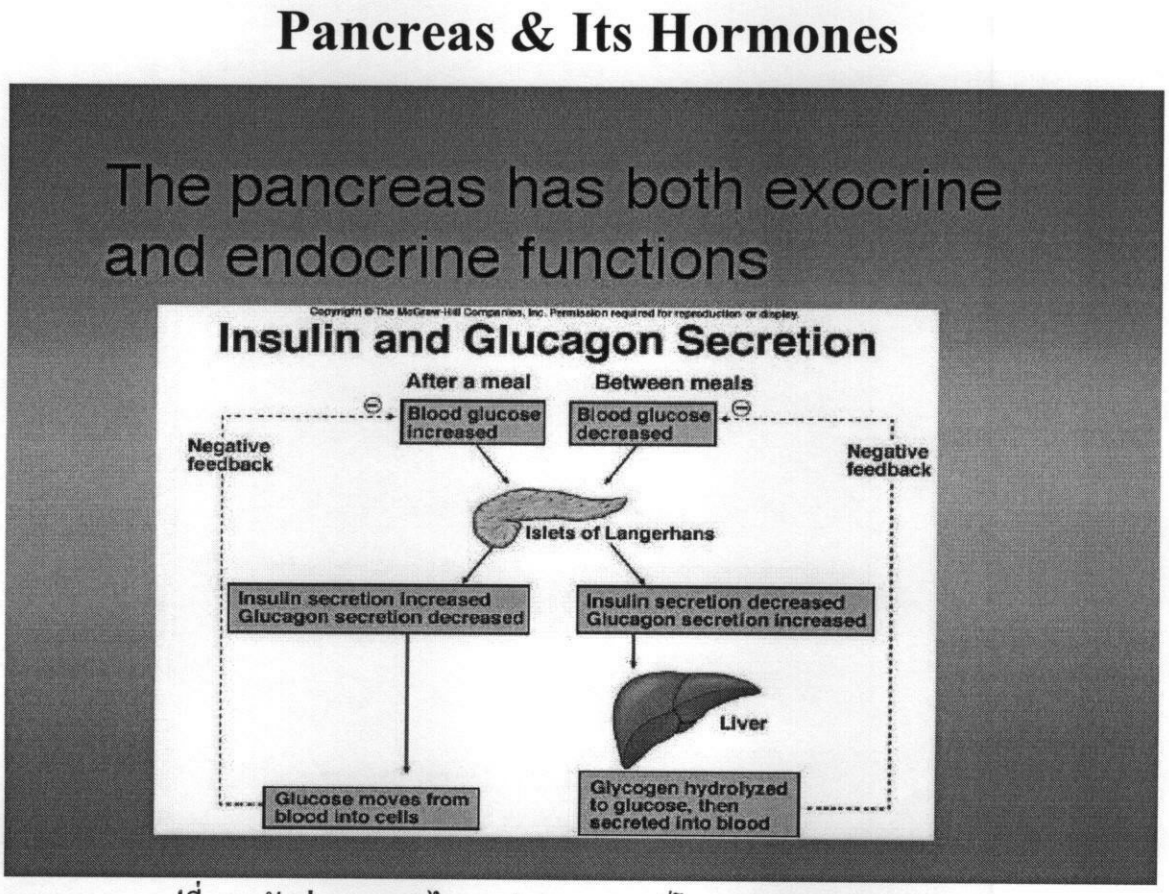
    • ชั้นใน (zona reticularis) สร้างและหลั่งฮอร์โมนเพศ (sexhormone) ได้แก่ estrogen, androgen (testosterone) ซึ่งมีผลต่อระบบสืบพันธุ์น้อยกว่าฮอร์โมนที่ได้จากรังไข่และอัณฑะ

- **ต่อมหมวกไตส่วนใน**

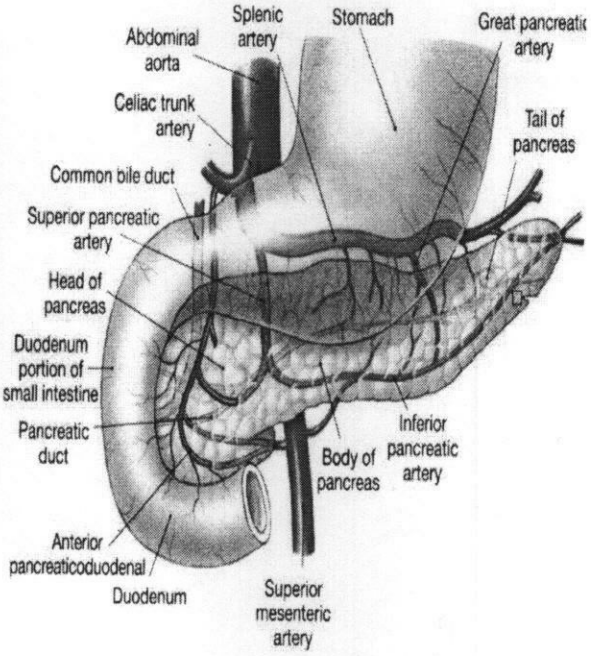
  สร้างและหลั่งฮอร์โมน cathecholamine ได้แก่ เอพิเนฟรีน (epinephrine) และนอร์เอพิเนฟรีน norepinephrine เป็นฮอร์โมนที่ถูกหลั่งออกมาเพื่อเตรียมร่างกายให้พร้อมรับการเผชิญภาวะคับขัน เคร่งเครียด ตื่นเต้น ต่อสู้ หนีภัย ตกใจ กลัว หิว กระหาย เจ็บปวดหรือเมื่อออกกำลัง

Pancreas

- Exocrine gland ◊ pancreatic juice
- Endocrine gland ◊islets of Langerhans; β-cell (centre, 60%) …..insulin, α-cells (periphery, 30%)……glucagon



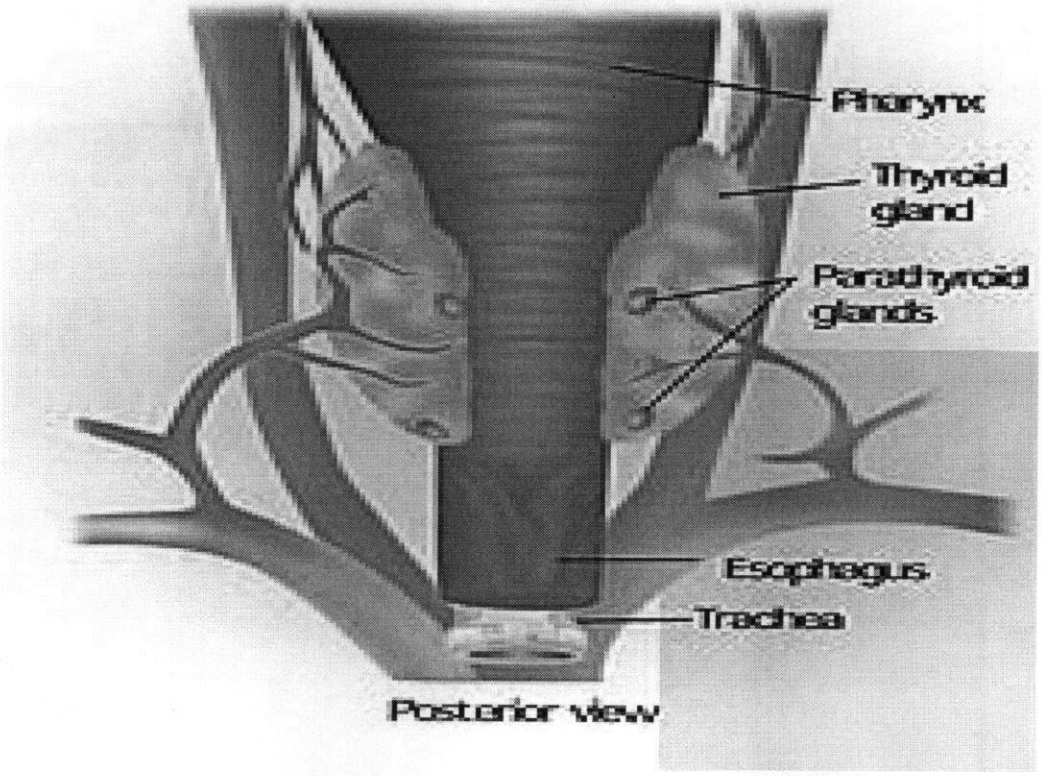
รูปที่ 26 ตับอ่อนและกลไกการทำงานของฮอร์โมน Insulin และ Glucagon



รูปที่ 27 ตับอ่อนในสัตว์

Parathyroid Glands & Hormones

- **Parathyroid hormone**
  - ทำให้ระดับแคลเซี่ยมเพิ่มขึ้น ฟอสเฟตต่ำลง
  - ฮอร์โมนจะถูกกระตุ้นให้หลั่งเมื่อระดับแคลเซี่ยมในพลาสม่าต่ำลงโดย (1) กระตุ้นการทำงานของ osteoclast ในกระดูกให้เกิดการสลายกระดูก (bone resorption) ปล่อยแคลเซี่ยมเข้าสู่กระแสเลือด (2) เพิ่มการดูดกลับของแคลเซี่ยมที่ท่อไต
  - เพิ่มการขับถ่ายฟอสเฟต และ ไบคาร์บอเนต
  - PTH ไม่มีผลโดยตรงต่อการดูกกลับของแคลเซี่ยมที่ลำไส้ แต่มีผลทางอ้อม
  - ในภาวะ hypophosphatemia จะกระตุ้นการสร้าง 1, 25 dihydroxycholecalciferolซึ่งเป็นเมตาบอไลท์ที่มีฤทธิ์รุนแรงมากของวิตามินดี มีผลกระตุ้นการดูดซึมของแคลเซี่ยมที่ลำไส้
  - ระดับแคลเซี่ยมในเลือดลดลงจะกระตุ้นการหลั่ง
  - ระดับแมกนีเซี่ยมในเลือดลดลงจะยับยั้งการหลั่ง



รูปที่ 28 ต่อมไทรอยด์ (Thyroid gland) และต่อมพาราไทรอยด์ (Parathyroid gland)

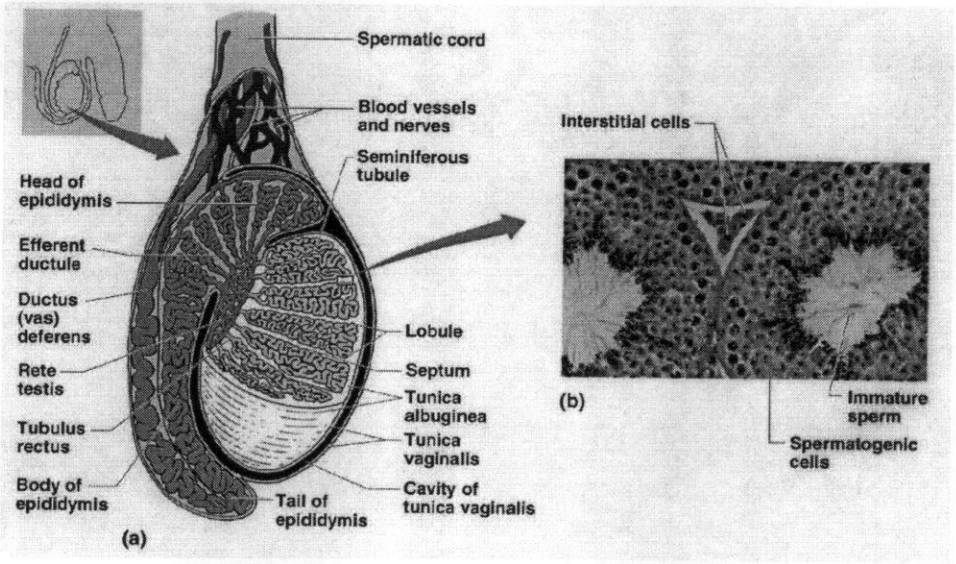
- **Calcitonin (สร้างมาจาก thyroid gland)**
  - ยับยั้งการสลายของกระดูก ทำให้แคลเซี่ยมในเลือดน้อยลง
  - เพิ่มการทำงานของ osteoblast เพื่อสร้างกระดูกใหม่
  - ลดการดูดกลับของแคลเซี่ยมและฟอสเฟทที่ไต
  - ยับยั้งการสร้าง 1, 25 dihydroxycholecalciferol
  - ระดับแคลเซี่ยมในเลือดสูงจะกระตุ้นการหลั่ง hormone นี้

ฮอร์โมนจากเซลล์เยื่อเมือกของกระเพาะอาหารและลำไส้

- **Gastrin กระตุ้นให้มีการสร้างและหลั่งกรดเกลือ**
- **Cholecytokinin - gall bladder**
- **Secretin – pancreas**

ฮอร์โมนของอวัยวะสืบพันธุ์

- **อัณฑะ**
  - **Testosterone** (สร้างมาจาก Leydig cells ,Leydig's cell, interstitial cells)
    - กระตุ้นอวัยวะสืบพันธุ์ให้เจริญเติบโต
    - กระตุ้นให้สัตว์ตัวผู้มีความรู้สึกทางเพศ (libido) และสนใจเพศเมีย
    - ทำให้เกิดการกระจายไขมัน สัตว์ตัวผู้จะมีไขมันสะสมอยู่ใต้ผิวหนังน้อยกว่าสัตว์เพศเมีย
    - กระตุ้นให้ร่างกายสร้างโปรตีนมากขึ้น ออกฤทธิ์ต่อกล้ามเนื้อลาย
    - กระตุ้นกระดูกเจริญเติบโต
    - กระตุ้นให้ไขกระดูกสร้างเม็ดเลือดแดงเพิ่ม ทำให้ค่า hematocrits สูงกว่าเพศเมีย
    - กระตุ้นให้มีการสะสมของเกลือแร่
- **รังไข่**
  - **Estrogen** (จากfollicular cells ของ follicle)
    - **ท่อนำไข่** มีผลทำให้มีสารคัดหลั่งเพิ่ม และการหดตัวของท่อถี่ขึ้น
    - **มดลูก** กระตุ้นให้เซลล์เยื่อบุมดลูกแบ่งตัว ทำให้เยื่อบุมดลูกหนา กระตุ้นให้เส้นเลือดแดงที่ผนังมดลูกเจริญ กระตุ้นการหดตัวของกล้ามเนื้อมดลูก เพิ่มความไวของกล้ามเนื้อมดลูกต่อ oxytocin กระตุ้นต่อมที่ปากมดลูกให้หลั่งเมือก
    - **ช่องคลอด** กระตุ้นให้เซลล์เยื่อบุช่องคลอดแบ่งตัว ทำให้เยื่อบุช่องคลอดหนา
    - **อวัยวะสืบพันธุ์ภายนอก** กระตุ้นให้มีการเจริญเติบโตเมื่อเข้าสู่ puberty
    - **เต้านม** กระตุ้นให้มีการเจริญเติบโตเมื่อเข้าสู่ puberty
    - **เนื้อเยื่ออื่น** กระตุ้นการเจริญเติบโตของกระดูก กระตุ้นให้มีการสร้างไขมัน



รูปที่ 29 อัณฑะ (Testis) และเซลล์ที่สร้างตัวอสุจิ (Sperm)

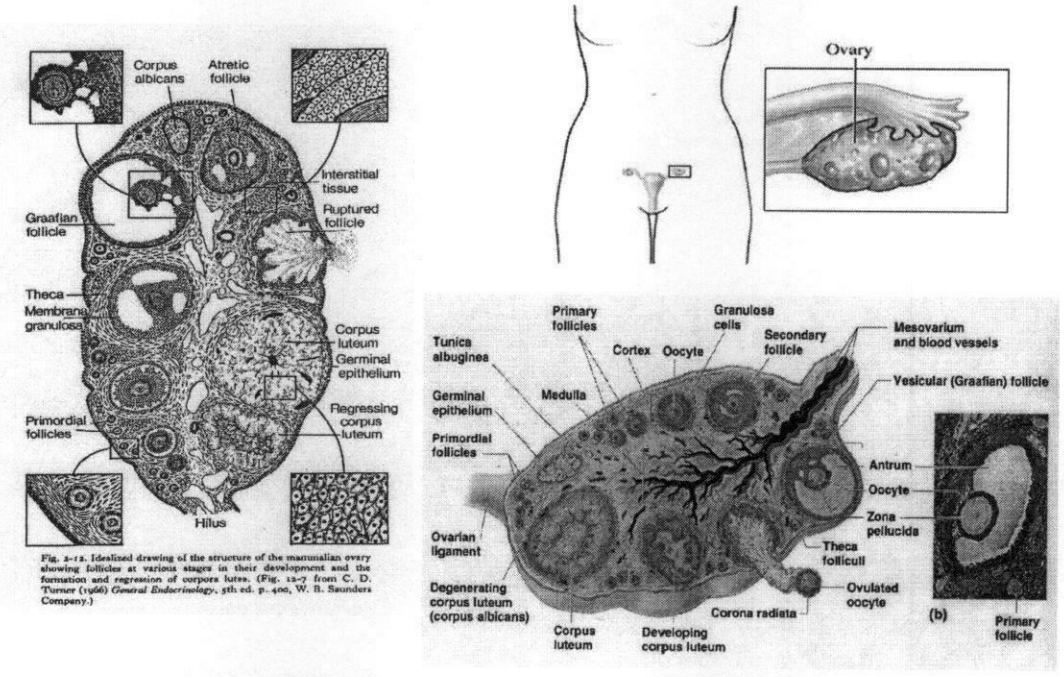


Fig. 2-12. Idealized drawing of the structure of the mammalian ovary showing follicles at various stages in their development and the formation and regression of corpora lutea. (Fig. 12-7 from C. D. Turner (1966) *General Endocrinology*, 5th ed. p. 400, W. B. Saunders Company.)

รูปที่ 30 รังไข่ (Ovary) และการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ในรังไข่

- **Progesterone (จาก corpus luteum (CL) ที่รังไข่)**
    - **ท่อนำไข่** มีผลลดการหดตัวของท่อ
    - **มดลูก** กระตุ้นให้เซลล์เยื่อบุมดลูกแบ่งตัว ทำให้เยื่อบุมดลูกหนา กระตุ้นให้เส้นเลือดแดงที่ผนังมดลูกเจริญ ลดการหดตัวของกล้ามเนื้อมดลูก ลดความไวของกล้ามเนื้อมดลูกต่อ oxytocin กระตุ้นให้มดลูกหลั่ง uterine milk
    - **เต้านม** กระตุ้นให้มีการเจริญเติบโตต่อจาก estrogen
    - **ยับยั้งการตกไข่**
    - **ทำให้มีการคั่งของน้ำในไตและมีการสะสมของเหลวในร่างกายมากขึ้น**

- **Relaxin (จาก ovary)**
    - ตรวจพบได้ขณะตั้งท้อง ทำให้ sarcroiliac joint เกิดการหย่อนทำให้ birth canal กว้างออกในขณะคลอด

- **รก (placenta) สร้าง**
    - HCG (Human chorionic gonadotropin) (คน)
    - PMSG (Pregnant mare serum gonadotropin) พบในม้ามีฤทธิ์คล้าย FSH
    - Progesterone & Estrogen

Prostaglandins

- จัดเป็นฮอร์โมนชนิดหนึ่ง แยกได้จากเนื้อเยื่อหลายชนิด เช่น ผิวหนัง ลำไส้ ไต สมอง ปอด อวัยวะสืบพันธุ์
    - มีผลทำให้ความดันเลือดลดลง
    - **ทำให้มดลูกเกิดการหดตัว (PGF2-ALPHA, UTERUS)**
    - เพิ่มการไหลผ่านเลือดของไต

ฮอร์โมนและการผลิตสัตว์

- **to treat sick animals** (therapeutic)
- **to prevent disease** (dosing healthy animals)
- **to increase animal productivity** (more economical production of meat, milk and eggs)

โค

- **เพื่อให้เป็นประโยชน์ต่อการผลิตนมและการสืบพันธุ์**
- **ฮอร์โมนที่ใช้ได้แก่**
    - **Diethylstibestrol** เป็นสารสังเคราะห์ที่มีฤทธิ์คล้ายฮอร์โมนเอสโตรเจนได้ถูกนำมาใช้มากในการขุนโคตัวผู้ซึ่งทำให้โคสะสมไขมันในร่างกายรวดเร็วขึ้น อาจใช้ในการขับรกหลังคลอด ใช้ในการขยายตัวและเจริญของเต้านมและทำให้เกิดการสร้างนม (ข้อเสีย ทำให้โคมีโอกาสเป็นโรคไข่ค้างในรังไข่ (cystic ovaries) ช่องคลอดปลิ้นกลับ (vaginal prolapsed) และลดแคลเซี่ยมในกระดูก)
    - **Progestin** เป็นสารสังเคราะห์ที่มีฤทธิ์คล้ายฮอร์โมนโปรเจสเตอโรน ทำให้โคเป็นสัดในเวลาเดียวกันเพื่อผสมพันธุ์พร้อมๆกัน
    - **Prostaglandins** ทำให้โคเป็นสัดในเวลาเดียวกันเพื่อผสมพันธุ์พร้อมๆกัน
    - **GnRH** ใช้ในการแก้ไข cystic ovarian โดยจะไปกระตุ้นให้ไข่หลุดออกจากรังไข่
    - **Thyroprotein** เป็นสารที่ทำจากโปรตีนเคซีน มีฤทธิ์คล้าย thyroxine ซึ่งมีหน้าที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนอาหารในร่างกาย การใช้ฮอร์โมนชนิดนี้ในโคที่มี thyroxine ไม่มากพอจะทำให้โคนั้นให้นมเพิ่มขึ้นได้
    - **Bovine Somatotrophin (BST)** ใช้ในการขยายตัวและเจริญของเต้านมและทำให้เกิดการสร้างนม

สุกร

- Growth Hormone หรือ porcine somatotrophin (PST) เพื่อเร่งการเจริญเติบโต

สัตว์ปีก

ข้อควรระวัง

- hormone use may overstress animals which are forced to produce more, e.g. cows injected with BST suffer more lameness and infection of the udder (mastitis) than normal
- hormone 'residues' may be present in meat or milk and become a hazard to people consuming the food (e.g. some anabolic steroids are believed to cause cancer if present at sufficient concentration

เอกสารประกอบการสอน

วิชา 303 318 Animal Physiology and Anatomy II

เรื่อง

ระบบทางเดินอาหาร

(Gastrointestinal System)

โดย

อาจารย์นายสัตวแพทย์ ดร. ภคนิจ คุปพิทยานันท์
ส.พบ., M.Res., Ph.D. (*Physiology*)

สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำนำ

เอกสารประกอบการสอนนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนวิชา 303 318 Animal Physiology and Anatomy ให้กับนักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์ชั้นปีที่ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หวังว่าเอกสารนี้จะเป็นประโยชน์ต่อนักศึกษาและผู้สนใจทั่วไป

อ.น.สพ.ดร. ภคนิจ คุปพิทยานันท์

ตุลาคม 2548

ระบบทางเดินอาหาร

(Gastrointestinal System)

Dr Pakanit Kupittayanant D.V.M., Ph.D.

เนื้อหาประกอบด้วย

- ระบบทางเดินอาหารโดยทั่วๆไป
  - โครงสร้างของทางเดินอาหาร
  - ขบวนการของระบบทางเดินอาหาร
  - ลักษณะของผนังทางเดินอาหาร
  - การไหลเวียนของเลือดในระบบทางเดินอาหาร
  - ระบบประสาทที่มาควบคุมทางเดินอาหาร
  - ฮอร์โมนที่มาควบคุมระบบทางเดินอาหาร
  - ส่วนต่างของทางเดินอาหารและอวัยวะที่เกี่ยวข้อง
- การย่อยและน้ำย่อยของระบบทางเดินอาหาร
- การดูดซึม
- การเคลื่อนไหวของระบบทางเดินอาหาร

Animals are classified by the types of food they ingest

- Carnivore - animal products
  - Dogs, Cats
- Herbivore - plant products
  - Cattle, Sheep, Goats, Horses
- Omnivore - combination of plant and animal products
  - humans, pigs

Animals are also classified by the type of stomach they have

- Monogastrics or non-ruminants
- Ruminants

Monogastric Animals

Monogastric – one or simple stomach structure

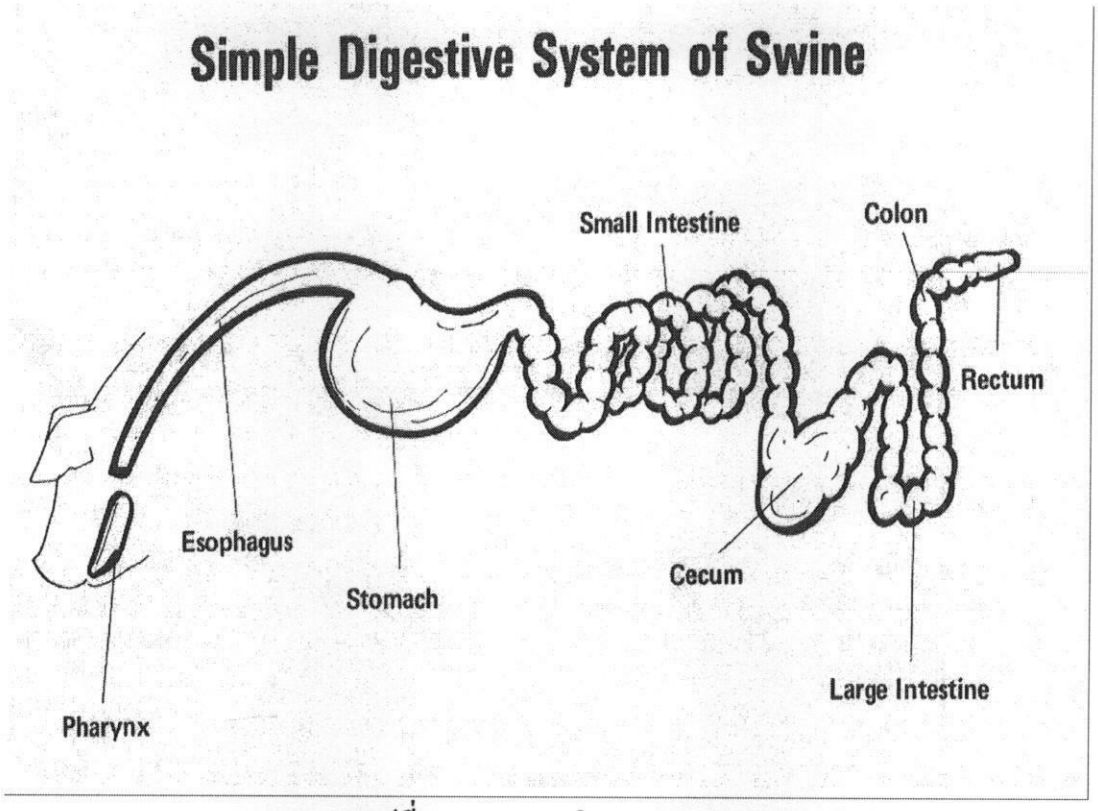
- mostly carnivores and omnivores
  - Very simple: mink and dog
  - Cecal digestion: horse, rabbit or rat

Sacculated stomach : kangaroo

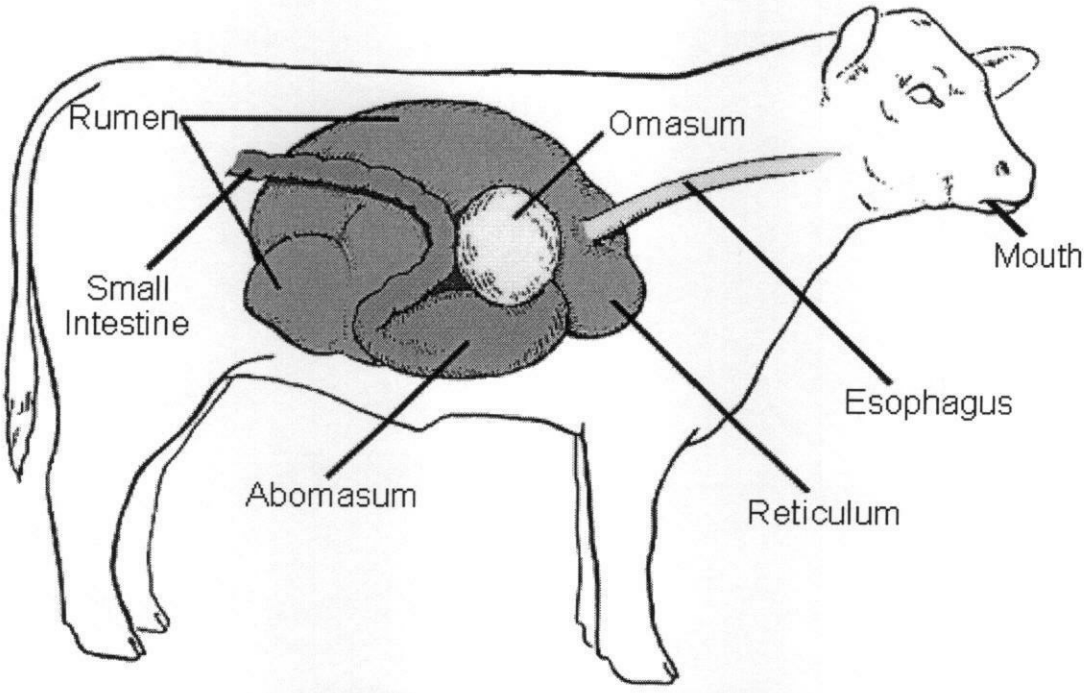
Ruminant Animals

Ruminant - 4 compartment stomach with the compartments before the "true" stomach

- herbivores
  - cattle, sheep, goats and pseudoruminants (llamas)



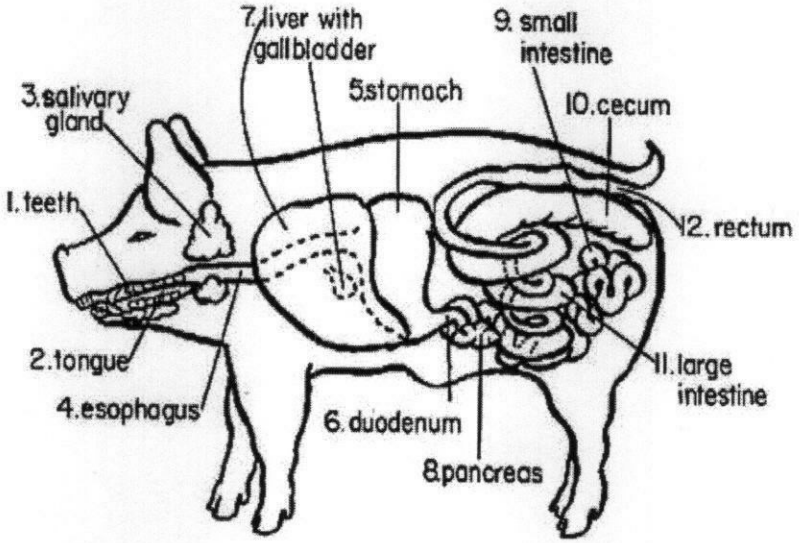
รูปที่ 1 ระบบทางเดินอาหารสุกร



รูปที่ 2 ระบบทางเดินอาหารของโค

โครงสร้างของระบบทางเดินอาหาร

1. **ส่วนที่เป็นทางเดินอาหาร** (Digestive Tract) ประกอบด้วย ปาก (mouth), คอหอย (pharynx), หลอดอาหาร (esophagus), กระเพาะอาหาร (stomach), ลำไส้เล็ก (small intestine), ลำไส้ใหญ่ (large intestine) และช่องทวารหนัก (anus)
2. **ส่วนที่จำเป็นต่อการทำงานของระบบทางเดินอาหาร** (accessory structure) ซึ่งจะอยู่นอกระบบทางเดินอาหารจะติดต่อกับทางเดินอาหารโดยท่อ (duct) ได้แก่ ต่อมน้ำลาย (salivary), ตับอ่อน (pancreas), ตับ (liver), ถุงน้ำดี (gall bladder)



รูปที่ 3 ทางเดินอาหารและอวัยวะประกอบ (Accessory gland) ของสุกร

ขบวนการของระบบทางเดินอาหาร

1. **การเคลื่อนไหว** (motility) เป็นการเคลื่อนที่ของอาหารจากปากไปยังส่วนต่างๆของทางเดินอาหาร อัตราการเคลื่อนที่ในส่วนต่างๆแตกต่างกันไป
2. **การหลั่ง** (secretion) เป็นการหลั่งของน้ำย่อยจากต่อมที่มีท่อ (exocrine gland) ตามทางเดินอาหาร
3. **การย่อย** (digestion) เป็นการย่อยอาหารที่มีโมเลกุลใหญ่ ให้กลายเป็นโมเลกุลเล็ก ที่สามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้

4. **การดูดซึม** (absorption) เป็นการดูดซึมอาหารที่ย่อยแล้วผ่านผนังของลำไส้เล็กเข้าไปยังเส้นเลือดหรือท่อน้ำเหลือง ซึ่งจะเป็นทางนำไปยังเซลล์ต่างๆในร่างกายส่วนอาหารที่ไม่ถูกย่อย (indigestible materials) หรือของเสีย (waste product) จะถูกขับออกจากทางร่างกายทางทวารหนัก

ลักษณะของผนังทางเดินอาหาร

- **เมื่อตัดตามขวาง แบ่งออกเป็น 4 ชั้น**
- **เริ่มจากชั้นในสุดคือ**

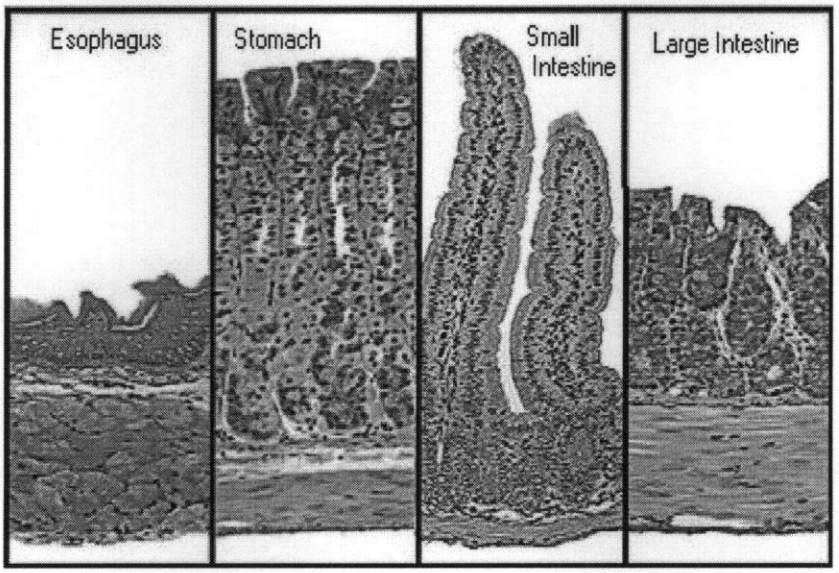
1. **ชั้นเยื่อเมือก** (mucosa) ประกอบด้วยเยื่อบุ (epithelium), larmina propria (เป็นชั้นของ connective tissue) และ muscularis mucosa
2. **ชั้นใต้เยื่อบุ** (submucosa) เป็นพวก connective tissue ซึ่งประกอบด้วยเส้นเลือดและท่อน้ำเหลือง และยังมีท่อ และกลุ่มเซลล์ประสาท (plexus of nerve cells)
3. **ชั้นกล้ามเนื้อ** (muscularis coat) ประกอบด้วยกกล้ามเนื้อเรียบ 2 ชั้น คือชั้นในสุดเป็นกล้ามเนื้อเรียบที่เรียงตัวแบบวงกลม (circular muscular layer) และกล้ามเนื้อเรียบที่เรียงตัวตามยาวอยู่ชั้นนอก (longitudinal muscular layer)

ชั้นเยื่อหุ้ม (serosa) เป็นชั้นของ connective tissue อยู่ชั้นนอกสุด มีลักษณะเรียบและเปียกชื้น เพื่อป้องกันการเสียดสีในขณะที่มีการเคลื่อนไหวของลำไส้ในบริเวณชั้นเยื่อหุ้มนี้จะมี mesentary ซึ่งเป็นทางเข้าและออกจากทางเดินอาหารของเส้นเลือด, ท่อน้ำเหลืองและเส้นประสาท

- Submucosal Plexus หรือ Meissner's Plexus เป็นกลุ่มของเซลล์ประสาทที่อยู่ระหว่างชั้นใต้เยื่อบุและชั้นกล้ามเนื้อเรียบที่เรียงตัวแบบวงกลม ทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนไหวของชั้นเยื่อเมือก

- Myenteric Plexus หรือ Auerbach's Nerve Plexus เป็นกลุ่มของเซลล์ประสาทที่อยู่ระหว่างชั้นของกล้ามเนื้อเรียบที่เรียงตัวเป็นแบบวงกลม และชั้นของกล้ามเนื้อเรียบที่เรียงตัวตามยาว ทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนไหวของกล้ามเนื้อเรียบ 2 ชั้นนี้เพื่อคลุกเคล้าอาหารและบีบไล่อาหารลงสู่ส่วนล่าง

รูปผนังทางเดินอาหาร

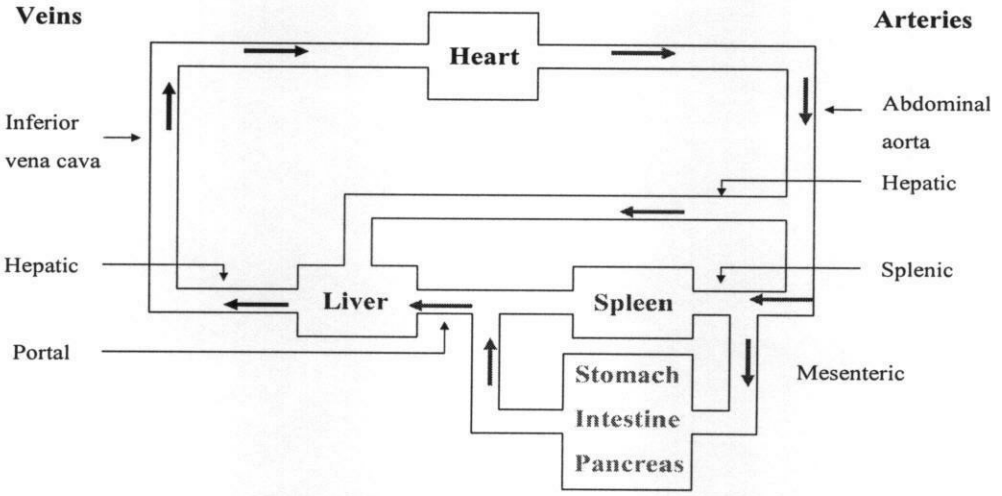


รูปที่ 4 ลักษณะของผนังทางเดินอาหารส่วนต่าง ๆ

การไหลเวียนเลือดในระบบทางเดินอาหาร

- การไหลเวียนของเลือดในบริเวณกระเพาะอาหาร, ลำไส้เล็ก, ลำไส้ใหญ่, ตับ, ตับอ่อน และม้าม (ม้ามไม่ใช่ส่วนของระบบทางเดินอาหาร) เรียก Splanchnic circulation
- เลือดที่ออกจากหัวใจจะไปยังอวัยวะเหล่านี้โดยเส้นเลือดแดงที่แยกออกจาก abdominal aorta เลือดจะผ่านจากกระเพาะอาหาร, ลำไส้เล็ก, ลำไส้ใหญ่, ตับอ่อน แล้วจึงจะผ่านไปที่ตับ โดย portal vein ในส่วนนี้เรียกว่า portal circulation ดังนั้นอาหารที่ถูกย่อยและถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายแล้วจะผ่านมายังตับ ก่อนที่จะนำไป ยังส่วนต่างๆของร่างกาย เมื่อออกจากตับแล้วก็จะเข้าสู่ inferior vena cava กลับเข้าสู่หัวใจ

การไหลเวียนในระบบทางเดินอาหาร



รูปที่ 5 การไหลเวียนโลหิตในระบบทางเดินอาหาร

ระบบประสาทที่มาควบคุมระบบทางเดินอาหาร

1. Myogenic control เป็นคุณสมบัติของกล้ามเนื้อเรียบภายในทางเดินอาหารเอง เรียกว่า syncytium ซึ่งเมื่อเกิด action potential ขึ้นที่จุดใดจุดหนึ่งก็สามารถติดต่อกันไปทั่วกล้ามเนื้อ

2. Neural control เป็นการทำงานของเส้นประสาทแบ่งออกเป็น

1. Enteric nervous system เป็นการทำงานของกลุ่มเซลล์ประสาทที่อยู่ในทางเดินอาหารเอง ประกอบด้วย 2 กลุ่มเซลล์ประสาทคือ myenteric plexus และ submucosal plexus ซึ่งกลุ่มเซลล์ประสาทเหล่านี้จะติดต่อถึงกัน myenteric plexus ส่วนใหญ่จะควบคุมการเคลื่อนไหวของทางเดินอาหาร ส่วน submucosal plexus จะควบคุมการหลั่งน้ำย่อย อัตราการไหลของเลือดบริเวณทางเดินอาหารและการหดตัวของกล้ามเนื้อในชั้นใต้เยื่อบุ

2. Autonomic nervous system เป็นการทำงานของเส้นประสาทอัตโนมัติ คือ parasympathetic และ sympathetic nerve ซึ่งจะคิดต่อ กันทั้ง myenteric plexus และ submucosal plexus ด้วย

- Parasympathetic Nerve ได้แก่ vagus nerve ซึ่งส่วนใหญ่จะมีสาขาไปที่หลอดอาหาร, กระเพาะอาหาร, ตับอ่อนและส่วนต้นของลำไส้ใหญ่ และมี pelvic nerve ไป

ยังส่วนล่างของลำไส้ใหญ่ซึ่งมีหน้าที่ควบคุมการขับถ่าย การทำงานของ parasympathetic nerve จะไปเพิ่มการเคลื่อนไหวของทางเดินอาหารยกเว้นตรงกล้ามเนื้อหูรูดจะไปทำให้มีการคลายตัว parasympathetic system ยังมี postganglionic neurons อยู่ในบริเวณ myenteric และ submucosal plexus ด้วย ดังนั้นถ้ากระตุ้น parasympathetic nerve ก็จะมีผลเพิ่ม activity ของ enteric nervous system

- Sympathetic Nerve การกระตุ้น sympathetic nervous system จะไปยับยั้งหรือลด การเคลื่อนไหวของทางเดินอาหาร ยกเว้นตรงกล้ามเนื้อหูรูด จะไปทำให้เกิดการหดตัว และยับยั้งหรือลด activity ของ enteric nervous system ด้วย

ฮอร์โมนที่มาควบคุมระบบทางเดินอาหาร

- **Gastrin**: ฮอร์โมนที่หลั่งหลั่งจากเยื่อบุผิวของกระเพาะอาหาร มีหน้าที่สำคัญในการควบคุมหลั่งของ grastic acid และ secretion ของกระเพาะอาหาร
- **Cholecytokinin**: ฮอร์โมนที่หลั่งจากเยื่อบุผิวของลำไส้ มีหน้าที่สำคัญในการกระตุ้นการหลั่งของเอนไซม์ของตับอ่อนและน้ำดี
- **Secretin**: ฮอร์โมนที่หลั่งจากเยื่อบุผิวของลำไส้ มีหน้าที่สำคัญในการกระตุ้นการหลั่งของไบคาร์บอเนตจากตับอ่อนและตับ

ส่วนต่างๆของทางเดินอาหาร
Digestive Tract

ปาก
(Mouth)

- **ปาก (mouth)**
    1. ริมฝีปาก (lips)
    2. แก้ม (Cheeks)
    3. ขากรรไกร (Jaws)
    4. เพดานปาก (palate)
    5. ลิ้น (tongue)
    6. ฟัน (teeth)

- **ริมฝีปาก**
  - แบบอ่อนนิ่มและยืดหยุ่นได้มาก สามารถจับอาหารเข้าปากได้พบใน ม้า, แกะ, และแพะ
  - แบบแข็งอยู่กับที่พบในสุกร และ โค

- **แก้ม**
  - ประกอบด้วยกล้ามเนื้อซึ่งภายในบุด้วยเยื่อเมือก (mucous membrane) มีหน้าที่ช่วยในการเคี้ยวอาหารของลิ้นและฟัน
  - ในโคผนังด้านในของแก้มมีลักษณะเป็นตุ่มเรียกว่า conical papillae ซึ่งช่วยในการเคลื่อนย้ายอาหาร

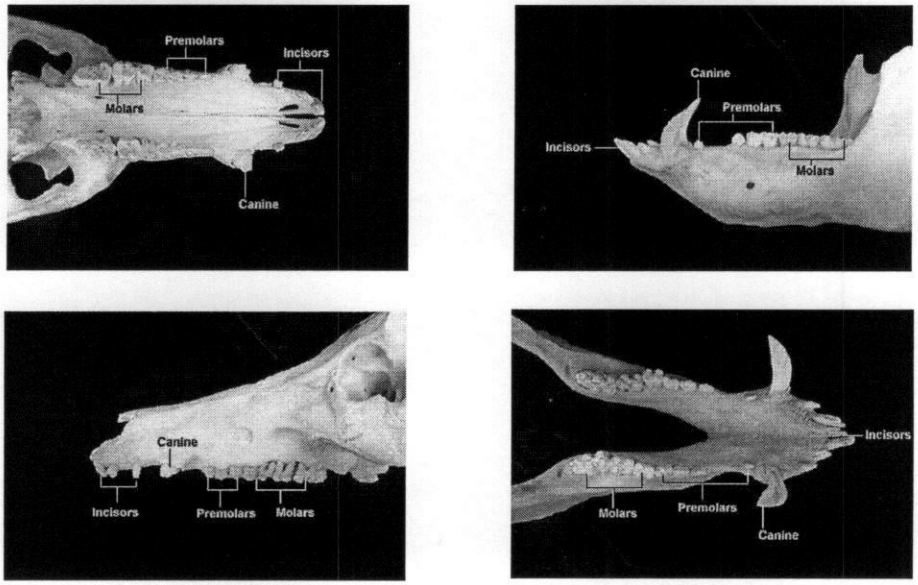
- **ขากรรไกร**
  - ประกอบด้วย ขากรรไกรบน (maxillary) และล่าง (mandible)
  - ถูกปกคลุมด้วยกล้ามเนื้อหลายชนิดที่ช่วยทำหน้าที่ในการเคี้ยว หุบปากและอ้าปาก กล้ามเนื้อมัดสำคัญที่ช่วยในการเคี้ยวคือ pterygoid muscle

- **เพดานปาก**
  - เป็นผนังด้านบนของช่องปากประกอบด้วย
    - เพดานแข็ง (hard palate) อยู่ด้านหน้าและเป็นกระดูก (bone)
    - เพดานอ่อน (soft palate) อยู่ถัดเข้าไปในปากเป็นกระดูกอ่อน (cartilage)

- **ลิ้น**
  - มีหน้าที่คลุกเคล้าอาหาร รับความรู้สึกเกี่ยวกับรสอาหาร
  - ลิ้นประกอบด้วยกล้ามเนื้อ 3 มัดมาประกอบกันคือ hypoglossal muscle, genioglossus muscle, styloglossus muscle

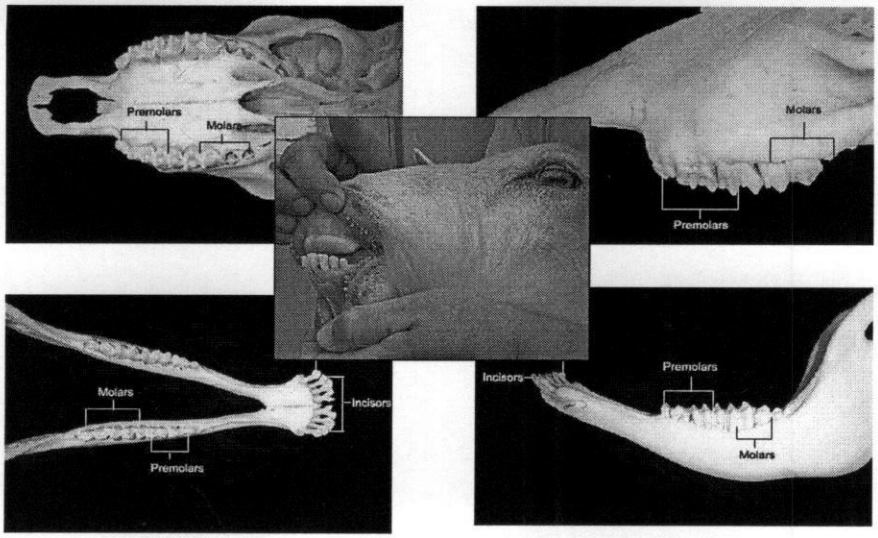
- **ฟัน**
  - แบ่งตามหน้าที่ ประกอบด้วย
    - ฟันหน้าหรือฟันตัด (incisors or cutting teeth, I)
    - ฟันเขี้ยว (canine or tearing teeth, C)
    - ฟันบดหรือฟันกราม (Grinding) แบ่งได้เป็น
      - Premolar teeth (P) หรือฟันกรามหน้า
      - Molar teeth (M) หรือฟันกรามหลัง

สุกร



รูปที่ 6 ลักษณะของฟันและขากรรไกรของสุกร

โค

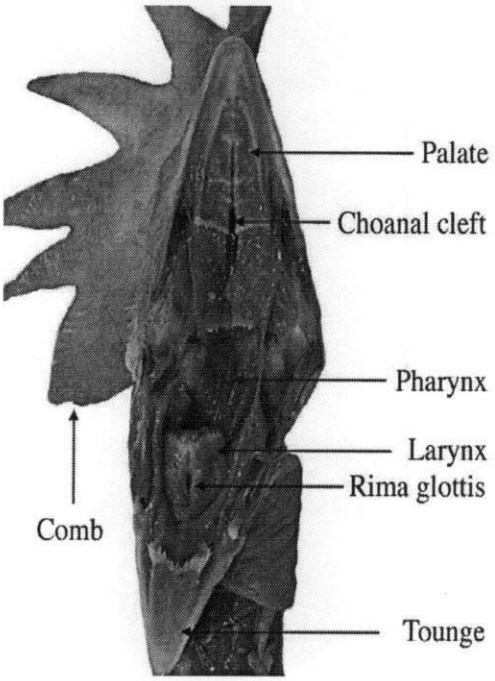


รูปที่ 7 ลักษณะของฟันและขากรรไกรของโค

- ในสัตว์ปีกไม่มีฟัน แต่มีจงอยปาก (Beak) ที่แข็งแรง และใช้กระเพาะบด (Gizzard) ช่วยบดแทนฟัน
- ในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยน้ำนมมีฟัน 2 ชุดคือ
    1. ฟันน้ำนม (temporary teeth) มีจำนวนและความแข็งแรงน้อยกว่าฟันแท้
    2. ฟันแท้ (permanent teeth or adult teeth)
- ส่วนประกอบของฟันจากนอกเข้าในประกอบด้วย
    1. Cement คือส่วนที่อยู่นอกสุดของฟัน มีสีเหลืองถึงดำ
    2. Enamel ส่วนที่แข็งที่สุดของฟันและของร่างกายมีสีขาวขุ่น
    3. Dentine เนื้อฟัน
    4. Pulp ของเหลวที่อยู่ใน pulp cavity ลักษณะเป็น soft gelatinous tissue
- รูปร่างของฟันประกอบด้วย
    1. Crown คือตัวฟันที่มองเห็นจากภานอกและเป็นส่วนที่โผล่ขึ้นมาจากขากรรไกร
    2. Root คือรากฟัน เป็นส่วนที่ฝังอยู่ใน teeth socket ของขากรรไกร
        - Incisor มี 1 ราก, Canine มี 2 ราก, Premolar มีหลายราก
    3. Neck คือคอฟันมีลักษณะคอด เป็นส่วนรอยต่อระหว่าง crown และ root

    Pulp cavity คือโพรงฟัน ขอบเขตยาวจากบริเวณ crown ถึง root เป็นที่อยู่ของ dental pulp, vessels, nerves

- Mouth and pharynx
  - **tongue and beak**
  - **choanal cleft**
  - **no soft palate**
  - **salivary glands**
  - **taste buds**



รูปที่ 8 ลักษณะของช่องปากในไก่

สูตรฟันน้ำนมครึ่งขากรรไกร

Species		I	C	P	M	Total
Equine	U	3	0	3	0	24
	L	3	0	3	0	
Bovine Sheep Goat	U	0	0	3	0	20
	L	4	0	3	0	
Swine	U	3	1	4	0	32
	L	3	1	4	0	
Human	U	2	1	2	0	20
	L	2	1	2	0	

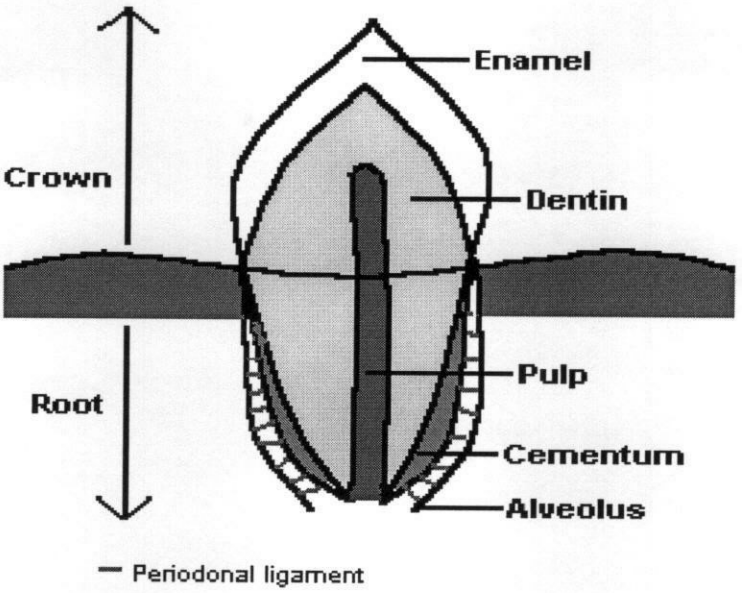
A

สูตรฟันแท้ครึ่งขากรรไกร

Species		I	C	P	M	Total
Equine	U	3	1	3 or 4	3	40 or 42
	L	3	1	3	3	
Bovine Sheep Goat	U	0	0	3	3	32
	L	4	0	3	3	
Swine	U	3	1	4	3	44
	L	3	1	4	3	
Human	U	2	1	2	3	32
	L	2	1	2	3	

B

ตารางที่ 1 สูตรฟันน้ำนมครึ่งขากรรไกร (A) และสูตรฟันแท้ครึ่งขากรรไกร (B) ในคนและสัตว์ต่าง ๆ



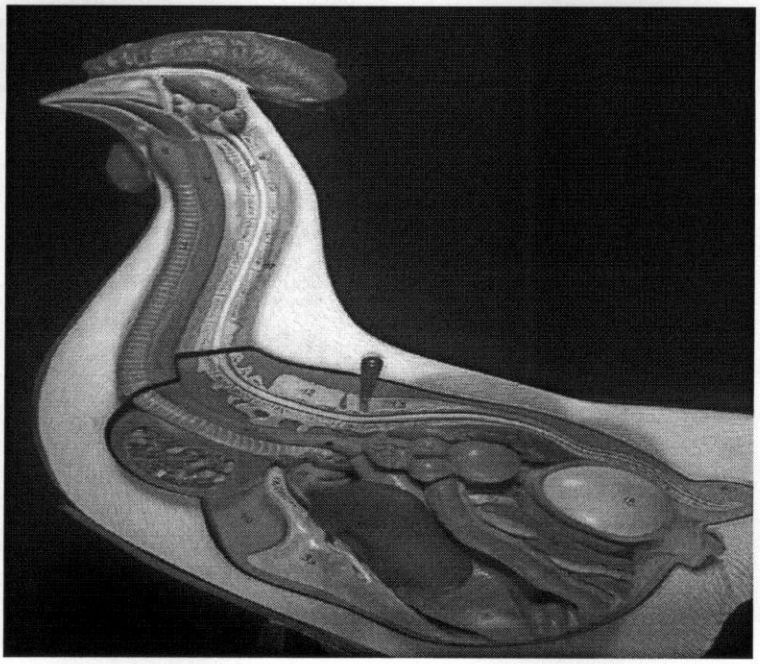
รูปที่ 9 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของฟัน

คอหอย

• คอหอย

หลอดอาหาร

- **หลอดอาหาร**
  - ลักษณะเป็นท่อจากคอหอยไปกระเพาะอาหาร
  - แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ
    - ส่วนคอ (cervical part)
    - ส่วนอก (thoracic part)
    - ส่วนท้อง (abdominal part)
  - ในโคโตเต็มที่อาจยาว 3-3.5 ฟุต เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว
  - กล้ามเนื้อส่วนต้นเป็นกล้ามเนื้อลาย ต่อไปที่เหลือเป็นกล้ามเนื้อเรียบประมาณ 1 นิ้วของด้านท้ายของหลอดอาหาร
  - ในสัตว์ปีกส่วนของหลอดอาหารจะโปร่งออกเป็นถุงสำหรับเก็บอาหารเรียกว่า crop

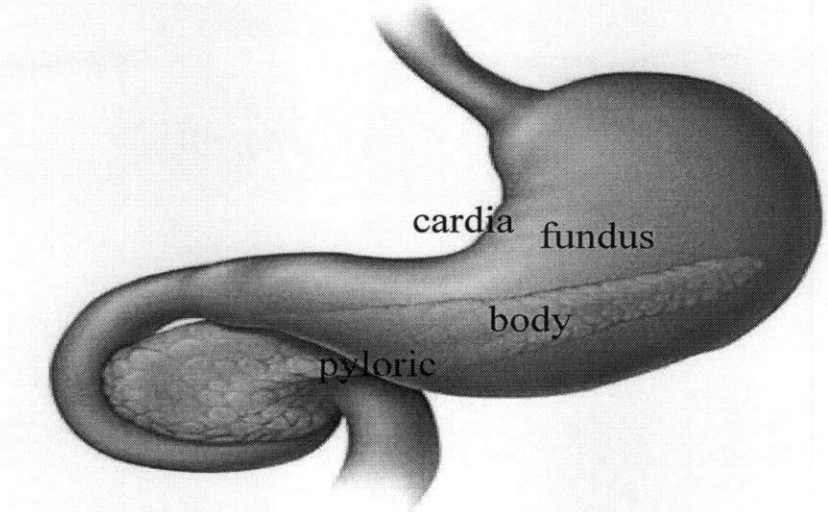


รูปที่ 10 ภาพหุ่นจำลองระบบทางเดินอาหารและระบบอื่น ๆ ในไก่

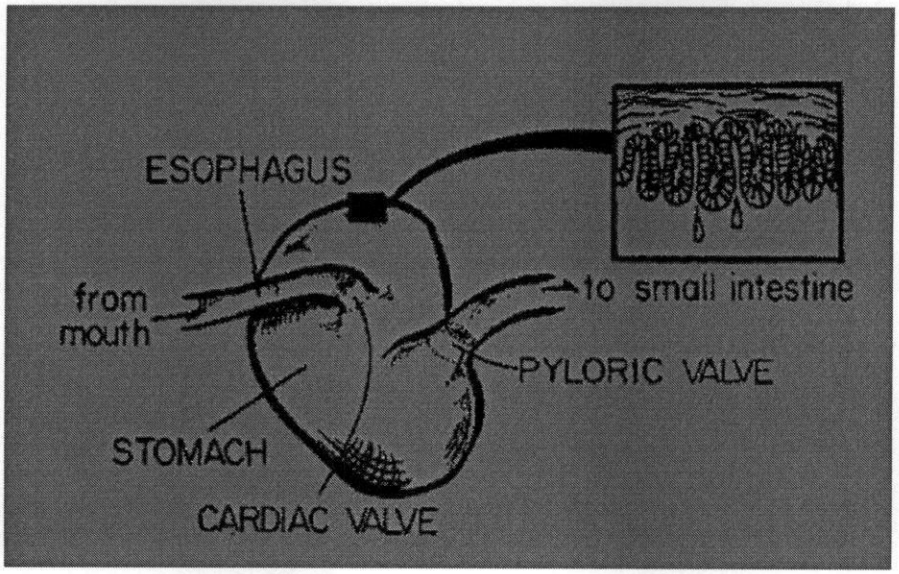
กระเพาะอาหาร

- **กระเพาะอาหาร**
  - **กระเพาะเดี่ยว (simple stomach)**
    - พบในคน สุกร ม้า สุนัข แมว
  - **กระเพาะรวม (poly stomach)**
    - พบในสัตว์เคี้ยวเอื้อง (ruminant) เช่น โค กระบือ เก้ง กวาง แพะ แกะ

- **กระเพาะเดี่ยว**
  - อยู่ระหว่างหลอดอาหารและลำไส้เล็ก ค่อนมาทางด้านซ้ายของลำตัว
  - J-shape แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ 1) cardia 2) fundus 3) body 4) pyloric part

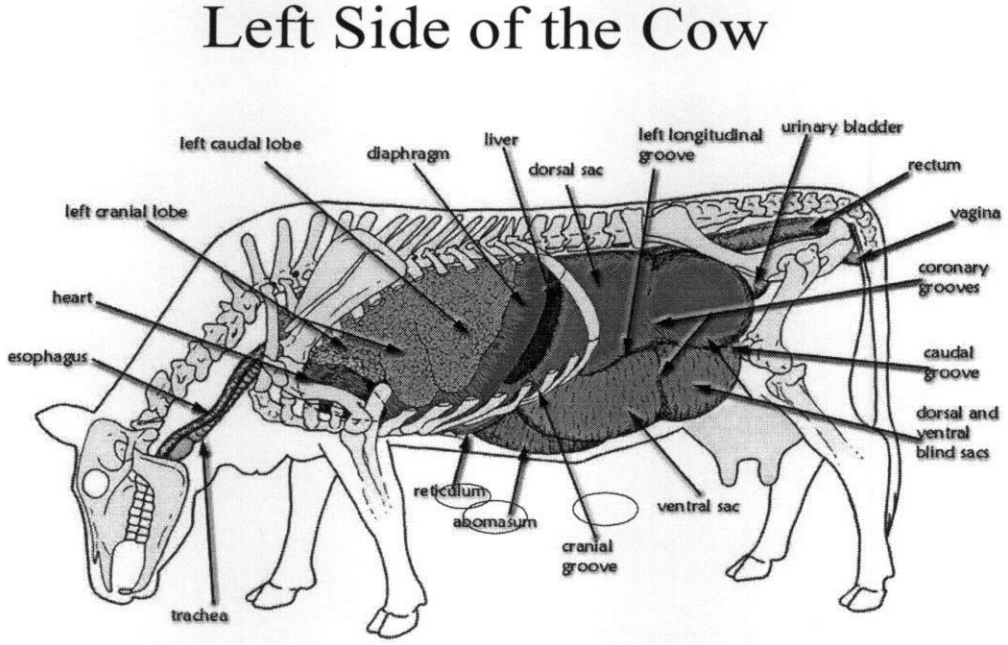


รูปที่ 11 กระเพาะอาหารและตับอ่อน

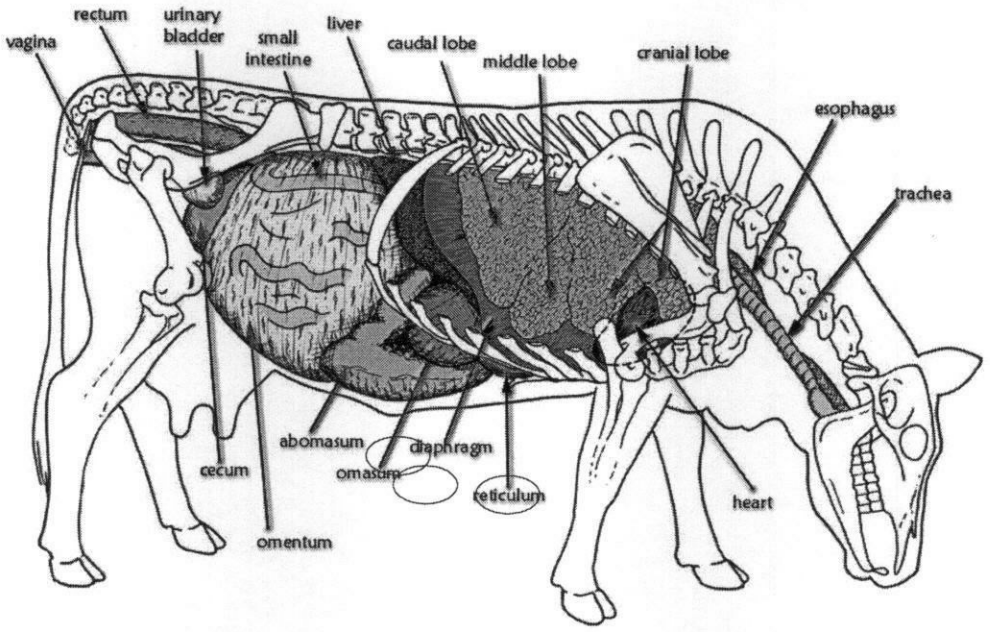


รูปที่ 12 กระเพาะอาหารของสุกร

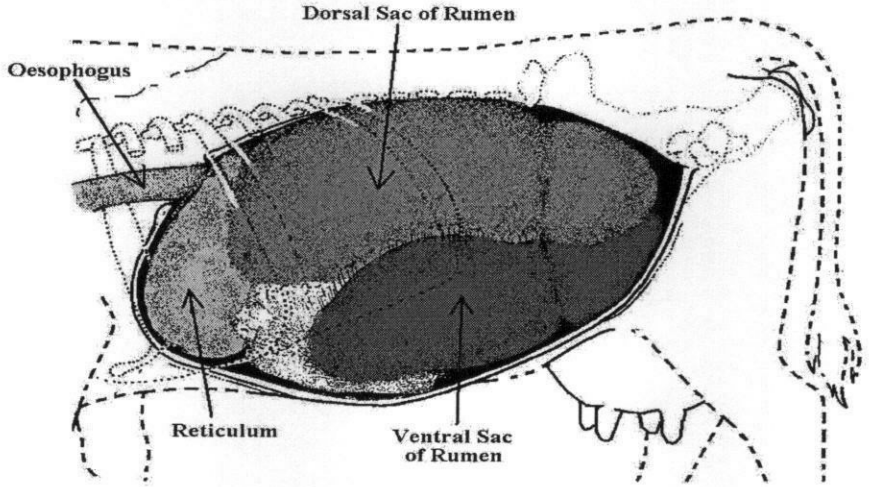
- **กระเพาะรวม (poly or compound stomach)**
  - ตำแหน่งค่อนมาทางด้านซ้ายของลำตัว
  - ประกอบด้วย 4 ส่วน คือ
    - Rumen กระเพาะผ้าขี้ริ้วหรือกระเพาะหมัก
    - Reticulum กระเพาะรังผึ้ง
    - Omasum กระเพาะสามสิบกลีบ
    - Abomasum กระเพาะแท้



รูปที่ 13 อวัยวะในระบบทางเดินอาหารทางด้านซ้ายของลำตัวของโค



รูปที่ 14 อวัยวะในระบบทางเดินอาหารทางด้านขวาของลำตัวโค



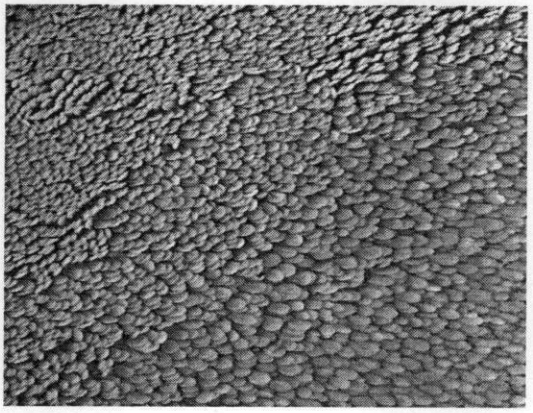
รูปที่ 15 กระเพาะรวมของโค (ด้านซ้ายของร่างกาย

- **Rumen**

– เป็นส่วนที่ใหญ่ที่สุด ที่ผนังด้านในมีส่วนที่ยื่นออกมาคล้ายผ้าขี้ริ้ว
– มีตำแหน่งอยู่ทางด้านซ้ายของลำตัว ตั้งแต่ rib ที่ 7-8 ถึงช่องเชิงกราน
– มีหน้าที่หมักย่อยและเก็บอาหารที่กินเข้าไปเพื่อรอการขย้อนออกมาเคี้ยวเอื้องโดยมี rumen flora คือ bacteria และ protozoa ทำหน้าที่ช่วยย่อย (หมัก) อาหารที่เป็น cellulose
– rumen แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ dorsal กับ ventral sac โดย longitudinal groove
– ในลูกสัตว์ rumen ต้องการเวลาในการพัฒนา 14-15 weeks หรือมากกว่าจึงจะทำหน้าที่ได้สมบูรณ์

ในลูกสัตว์เวลาดูดนม น้ำนมจะลงมาตามร่องที่เรียกว่า sulcus rumino reticulus หรือ esophageal groove ซึ่งนำนมจาก esophagus ไปยัง abomasum โดยไม่ผ่าน rumen และ reticulum ถ้านมผ่านลงไปใน rumen จะเกิดการหมัก ทำให้เกิดท้องเสีย (diarrhea)หรือท้องอืด bloat

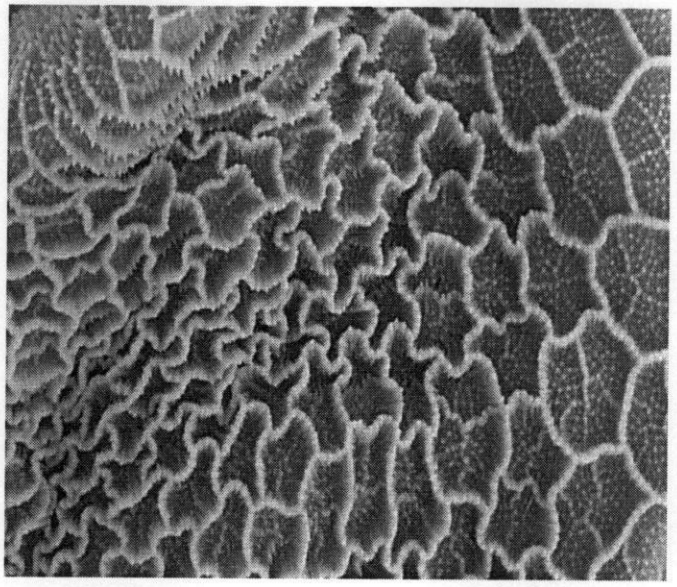
Rumen



รูปที่ 16 ผนังด้านในของ Rumen ในโค

- **Reticulum**
  - ขนาดเล็กที่สุด ความจุ 6% ของกระเพาะรวมทั้งหมด
  - ตำแหน่งประมาณ rib ที่ 6-8 ทางด้านซ้ายของร่างกาย
  - ผนังด้านในมี mucous membrane เป็นรูปหลายเหลี่ยม คล้ายกับรังผึ้ง เป็นที่ดักเก็บสิ่งแปลกปลอมที่กินเข้าไป (เศษลวด ตะปู)
  - "hardware disease"

Reticulum

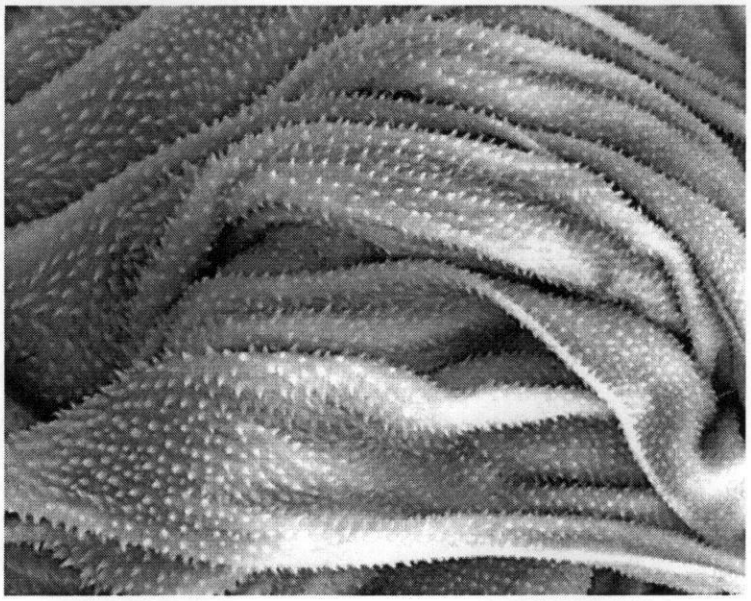


รูปที่ 17 ผนังด้านในของ Recticulum ในโค

- **Omasum**
  - มีรูปร่างกลม
  - หน้าที่บดอาหารให้ละเอียด

- **Abomasum**
  - ความจุ 8%
  - ตำแหน่งติดอยู่กับพื้นท้อง
  - มีการย่อยอาหารที่แท้จริง มีการหลั่ง gastric secretion และ กรดเกลือ

Omasum



รูปที่ 18 ผนังด้านในของ Omasum ในโค

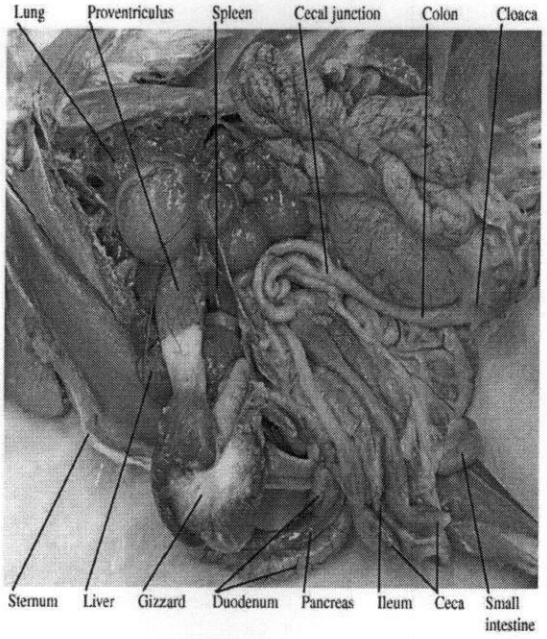
• กระเพาะของสัตว์ปีก

– แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

- ส่วนแรก เรียกว่า กระเพาะจริงหรือกระเพาะแท้ (proventriculus) ทำหน้าที่สร้างน้ำย่อย ซึ่งเทียบได้กับกระเพาะเดี่ยวหรือ abomasum ในสัตว์เคี้ยวเอื้อง
- ส่วนที่สอง เป็นส่วนที่อยู่ต่อมาจากส่วนแรก มีหน้าที่บดอาหารแข็งให้เล็กลง เรียกว่า กระเพาะบดหรือกึ๋น (Gizzard or Ventriculus)

Proventriculus

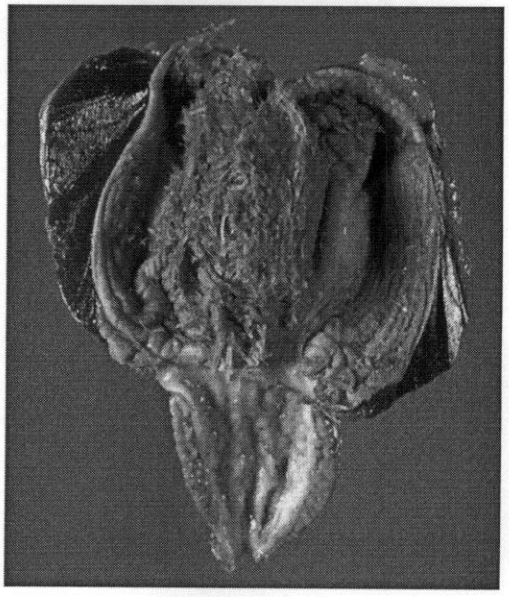
- **Proventriculus**
  - fusiform, variable relative size
  - *chief* cells
  - mucus cells
- **Note location of gizzard (ventriculus)**
- **Secretions – proventriculus**
  - Chief cells secrete HCl and pepsin
  - mucus cells secrete mucus



รูปที่ 19 กระเพาะแท้ (Proventriculus) ของไก่

Gizzard

- **Gizzard (ventriculus)**
  - two pairs of muscles
    - thin and thick
  - koilin - protein lining
    - color related to bile pigments
  - mechanical digestion



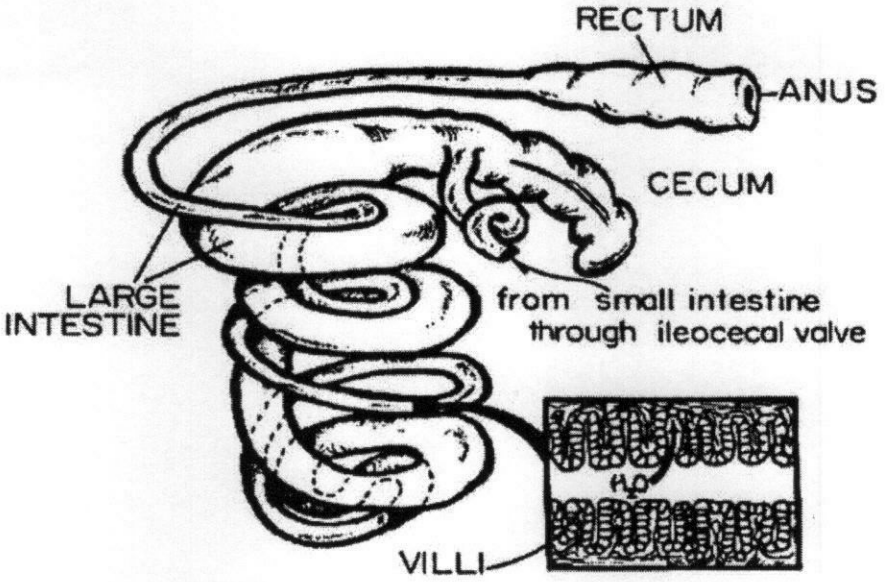
รูปที่ 20 กระเพาะบด (Gizzard) ของไก่

ลำไส้เล็ก

- **ลำไส้เล็ก**
  - อยู่ระหว่างกระเพาะอาหารและลำไส้ใหญ่
  - ยึดอยู่ด้วย fold ของ peritoneum ที่เรียกว่า mesentary
  - แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ
    - duodenum มีท่อของ bile duct และ pancreatic duct มาเปิดร่วม
    - jejunum
    - ileum
  - หน้าที่ย่อยและดูดซึมอาหารที่ย่อยแล้ว และสร้างเอนไซม์ เช่น amylase, lipase, lactase, maltase, sucrase, aminopeptidase, dipeptidase, nuclease

ลำไส้ใหญ่

- **ลำไส้ใหญ่**
  - **แบ่งออกเป็น 3 ส่วน**
    - **caecum**
    - **colon**
    - **rectum**
- **Caecum**
  - อยู่ระหว่าง ileum และ colon
  - ในม้าและสุกรมีขนาดใหญ่ เป็นที่หมักอาหารพวกหญ้าเหมือนใน rumen และเป็นที่สังเคราะห์ vitamin B complex และ vitamin K
  - ในไก่มี caecum 2 อัน ทำหน้าที่หมักอาหารบ้างเล็กน้อย
- **Colon**
  - spiral colon พบในโคและสุกร
  - ในสัตว์ปีกมีลักษณะเป็นท่อตรง
  - ในสุนัขและในคนมีลักษณะเป็นท่อนขดตัวไปข้างหน้าตามขวางแล้วไปข้างหลังของช่องท้อง
  - หน้าที่ของลำไส้ใหญ่ ช่วยย่อยอาหารพวกเยื่อใย หญ้า
  - สังเคราะห์ vitamin B complex และ vitamin K
  - ดูดซึมน้ำ
  - ขับถ่ายแร่ธาตุที่เหลือใช้เช่น Ca, P, Mg, F



รูปที่ 21 ลำไส้ใหญ่ของสุกร

- **Rectum**
  - ส่วนปลายสุดของลำไส้ใหญ่ อยู่ในช่องเชิงกราน

ทวารหนัก

- **Anus**
  - ประกอบด้วยกล้ามเนื้อ 3 ชั้น
    - ชั้นในสุด Sphincter ani internus
    - ชั้นกลาง Rectractor ani ดึง rectum เอาไว้ป้องกันไม่ให้ลำไส้ม้วนออกมาข้างนอก (prolapse of rectum)
    - ชั้นนอกสุด Sphincter ani externus
  - ในสัตว์ปีกบริเวณที่ต่อจาก rectum เรียก cloaca ซึ่งเป็นทางเปิดร่วมกันระหว่างระบบสืบพันธุ์ ระบบทางเดินอาหารและระบบขับถ่ายปัสสาวะ

อวัยวะประกอบของทางเดินอาหาร

Digestive Accessory Structure

ต่อมน้ำลาย

- มี 3 ต่อม
  - parotid gland อยู่ใต้กกหู ผลิต serous fluid
  - sublingual gland อยู่ที่โคนลิ้น ผลิตทั้ง serous และ mucous fluid
  - mandibular gland อยู่ที่ขากรรไกร ผลิตทั้ง serous และ mucous fluid
- mucous secretion มีโปรตีน mucin เมื่อ mucin รวมกับน้ำจะมีลักษณะเหนียวทำหน้าที่หล่อลื่น
- serous secretion มี amylase หรือ ptyalin ทำหน้าที่ย่อยแป้ง ให้เป็น dextrin หรือ maltose และ glucose ถ้านานพอ

ตับอ่อน

- ติดอยู่กับลำไส้เล็กส่วนต้น
- compound tubular-alveolar gland
- ทำหน้าที่เป็นทั้ง endocrine และ exocrine gland
- exocrine gland สร้าง ไบคาร์บอเนต และ digestive enzyme เช่น amylase, lipase, trypsin, chymotripsin, carboxypeptidase, phospholipase
- เปิดเข้าสู่ duodenum ทาง pancreatic duct

การย่อยอาหาร

(Digestion)

- การทำให้อาหารมีขนาดเล็กลงและอยู่ในรูปที่ร่างกายสามารถดูดซึมไปใช้ประโยชน์ได้
- ขบวนการย่อยแบ่งเป็น 3 ประเภท
  - การย่อยทางกล (Mechanical digestion) เช่น การบดเคี้ยวอาหารโดยใช้ฟัน
  - การย่อยทางเคมี (Chemical digestion) เป็นการย่อยอาหารโมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลเล็กโดยอาศัยน้ำย่อย และสารอื่นๆเช่น HCl, $NaHCO_3$, Bile salt
  - การย่อยโดยจุลินทรีย์ (Microbial digestion) เป็นการย่อยโดยอาศัยเชื้อ bacteria หรือ protozoa โดยการหมัก (fermentation) เช่น ใน rumen หรือ caecum ของสุกรและม้า

การย่อยอาหารของสัตว์กระเพาะเดี่ยวและกระเพาะรวม

การย่อยในปาก

- **สัตว์กระเพาะเดี่ยว**
  - **การย่อยทางกล** อาหารถูกฟันบดเคี้ยวให้เล็กลง
  - **การย่อยทางเคมี** อาหารพวกแป้ง (starch) บางส่วนถูกย่อยโดย amylase (ptyalin) เป็น dextrin, maltose, glucose (ถ้านานพอ)
- **สัตว์กระเพาะรวม**
  - การย่อยจะไม่เกิดขึ้นเนื่องจากในน้ำลายไม่มีเอนไซม์ amylase อาหารจะถูกกลืนลงไปอย่างรวดเร็ว และปราศจากการเคี้ยวโดยละเอียด การผสมน้ำลายจะทำให้ลื่นพร้อมที่จะกลืนลงสู่หลอดอาหาร
  - น้ำลายจะมีฤทธิ์เป็นด่าง (pH 8.1-8.3)

การย่อยในกระเพาะอาหาร

- **สัตว์กระเพาะเดี่ยว**
  - มีน้ำย่อยคือ pepsin, rennin, lipase และ กรดเกลือ HCl
  - pepsin ย่อย protein ได้เป็น proteone, peptones, polypeptides, amino acid
  - rennin ย่อยโปรตีนในน้ำนม จับตัวเป็นก้อนเดินทางในลำไส้เล็กช้าลง ทำให้เอนไซม์ย่อยโปรตีนในลำไส้เล็กย่อยต่อไป
- **สัตว์กระเพาะรวม**
  - มีการย่อยเกิดขึ้นที่ rumen และ abomasum
  - ใน abomasum การย่อยจะเหมือนสัตว์กระเพาะเดี่ยว
  - ไม่เกิดการย่อยขึ้นที่ reticulum เนื่องจากเยื่อบุผิวไม่ได้ผลิตน้ำย่อย แต่มีหน้าที่ช่วยนำอาหารกลับสู่ลำคอ และควบคุมอาหารจาก rumen ไป omasum
  - omasum จะทำหน้าที่เกี่ยวกับการดูดซึมน้ำและกรดอินทรีย์บางชนิด และบีบตัวเพื่อสำรอกอาหาร และเพื่อเข้าสู่กระเพาะแท้

- **การย่อยอาหารในกระเพาะ rumen**

rumen มีหน้าที่

1. เก็บอาหาร อาหารที่ถูกกินเข้าไปจะถูกนำมาเก็บไว้ใน rumen เพื่อรอการสำรอกขึ้นปากสำหรับการเคี้ยวใหม่ เมื่อสัตว์กินอาหารเสร็จแล้วสัตว์จะพักและสำรอกอาหารที่ยังเป็นชิ้นใหญ่กลับเข้าสู่ปากเพื่อบดเคี้ยว
2. ทำให้อาหารที่ลักษณะหยาบละเอียดขึ้น โดยการบีบตัวของกล้ามเนื้อ ปุ่มที่บุผนังก็จะโบกแกว่งเป็นผลให้อาหารมีขนาดเล็กลง
3. เป็นแหล่ง ferment อาหาร โดยอาศัยจุลินทรีย์ช่วยเนื่องจาก rumen ไม่สามารถผลิตน้ำย่อยได้เอง
4. ดูดซึม กรดไขมันระเหยได้ และผลผลิตที่เกิดขึ้นใน rumen

2. การย่อยอาหารในกระเพาะ rumen

1. **อาหารเยื่อใย** พืชที่กินเข้าไปจะมี คาร์โบไฮเดรตในรูปแป้งและเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะถูกจุลินทรีย์ในกระเพาะ rumen จะเปลี่ยนให้เป็น กรดไขมันที่ระเหยได้ volatile fatty acid ได้แก่ กรดอะซิติก โปรปีโอนิก บูทิวริก
2. **สร้างโปรตีน** จุลินทรีย์ในกระเพาะ rumen สามารถใช้สารประกอบไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีนให้เป็นโปรตีนของตัวจุลินทรีย์เอง
   สร้างวิตามิน B, C, และ K ได้ วิตามินจะถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดโดยตรง แต่ในลูกโคต้องการวิตามินเสริม

- **การย่อยอาหารในกระเพาะ rumen**

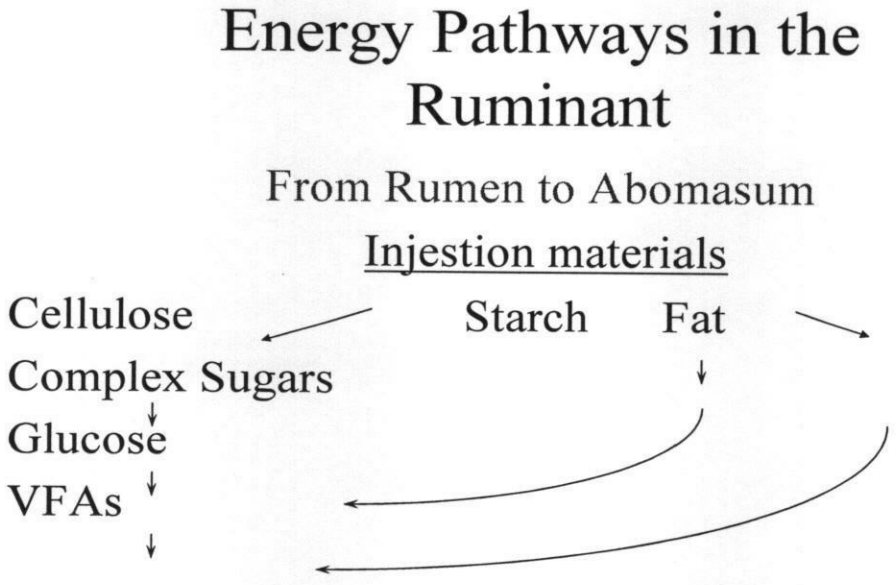
— **การย่อยคาร์โบไฮเดรต** ได้เป็น VFA

— **การย่อยโปรตีน** โปรตีนและ ไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีนจะถูกย่อยโดยจุลินทรีย์เป็น กรดอะมิโน เปปไทด์ และแกสแอมโมเนีย โปรตีนจะส่งผ่านไปยัง abomasum บางส่วนถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือด แอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะถูกใช้โดยจุลินทรีย์ ถ้ามากเกินไปจะถูกดูดซึมผ่านผนัง rumen เข้าสู่กระแสเลือดไปเปลี่ยนเป็น urea ที่ตับและขับออกจากร่างกายทางปัสสาวะ หรือนำหลับเข้าสู่ rumen ทางกระแสเลือดและเป็นแหล่งไนโตรเจนสำหรับจุลินทรีย์ ขณะที่โปรตีนเปลี่ยนไปเป็น แอมโมเนียโดยจุลินทรีย์ คาร์บอนซึ่งเป็นส่วนประกอบของโปรตีนจะถูกสลายออกมาและถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับจุลินทรีย์ในการสร้างโปรตีน การย่อยโปรตีนใน rumen จึงทำให้เกิด VFA เช่นเดียวกับการย่อยคาร์โบไฮเดรต

- **การย่อยของไขมัน** ไขมันที่ได้รับเข้าไปจะอยู่ในรูปของ triglyceride (glycerol + fatty acid) จะถูกเปลี่ยนโดยจุลินทรีย์ใน rumen เป็น glycerol และ fatty acid จากนั้น glycerol จะถูกเปลี่ยนเป็น โปรไบโอนิก และถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือด
- **การสังเคราะห์วิตามิน** สามารถสังเคราะห์ riboflavin, niacin, B12, patothenic acid จากจุลินทรีย์ใน rumen และยังสังเคราะห์ วิตามิน K ได้ ส่วนวิตามินที่ละลายได้ในไขมันตัวอื่นเช่น D และ E สังเคราะห์ไม่ได้จำเป็นต้องได้รับจากสารอาหาร

Rumen Microorganisms

- Bacteria and Protozoa
  - rumen environment is moist, warm, and provides a constant supply of nutrients
  - entire population of organisms depending on the kind and quality of the feed
  - when they are washed out of the omasum into the abomasum the acidic environment kills the microorganisms
  - provide amino acids and some energy



แผนภาพที่ 1 การสร้าง Volatile Fatty Acids ใน Rumen

- **การย่อยในลำไส้เล็ก**
  - น้ำย่อยจากลำไส้เล็ก
    - maltase moltose glucose + glucose
    - sucrase sucrose glucose + fructose
    - lactase lactose glucose + galactose
    - lipase monoglyceride glycerol + fatty acid
    - isomaltase dextrin glucose
    - aminopeptidase polypeptide amino acid
    - nuclease nucleic acid pentose, purine, pyrimidine
    - Enterokinase trypsinogen จาก pancrease trypsin

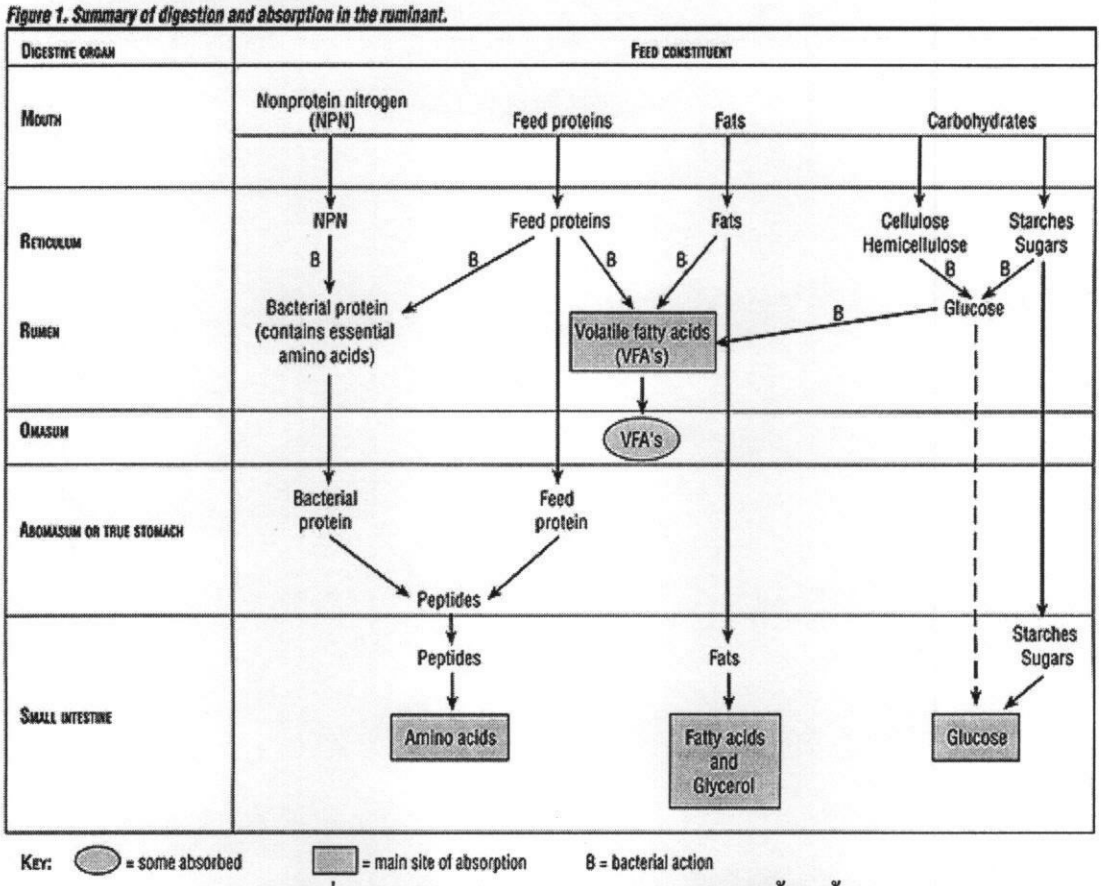
- **duodenum**
  - Cells release hormones that act on pancreas and gall bladder
    - secretin
    - pancreozymin
    - cholecystokinin

การย่อยในลำไส้ใหญ่

- **สัตว์กระเพาะเดี่ยว**
  - ไม่มีการย่อยอาหารเกิดขึ้น เนื่องจากไม่มีต่อมผลิตน้ำย่อย
  - แต่จะสร้างเมือกเพื่อช่วยให้อุจจาระจับเป็นก้อนและลื่นสะดวกต่อการขับถ่าย
  - มีหน้าที่ในการดูดน้ำกลับเพื่อให้อุจจาระแข็งเป็นก้อน
  - และยังขับเอา Ca, Mg, P ออกจากร่างกาย

- **สัตว์กระเพาะรวม**

Figure 1. Summary of digestion and absorption in the ruminant.



แผนภาพที่ 2 สรุปการย่อยและการดูดซึมในสัตว์เคี้ยวเอื้อง

Carbohydrate metabolism in rumen

- Carbohydrate contribute 70 to 80 percent of the diet dry matter while protein, fat and mimerals make up the remainder
- Carbohydrates are the primary energy source for the cow, support rumen function and microbial growth
- Two carbohydrate categories are found in feeds: cell soluble (sugar, starch), cell wall (pectin, cellulose, hemicellulose and lignin)
- These carbohydrates are digested by rumen microbes converting them to VFA with are the main source of energy for the cow
- Fiber digesting bacteria growth is favored when rumen pH is between 6.0 and 6.8
- Starch digesting bacteria growth is favored by a ph from 5.5 to 6.0
- Thus, the high producing cow must maintain a pH near 6.0 for optimal growth of both bacteria population, resulting in a favorable VFA pattern and yield

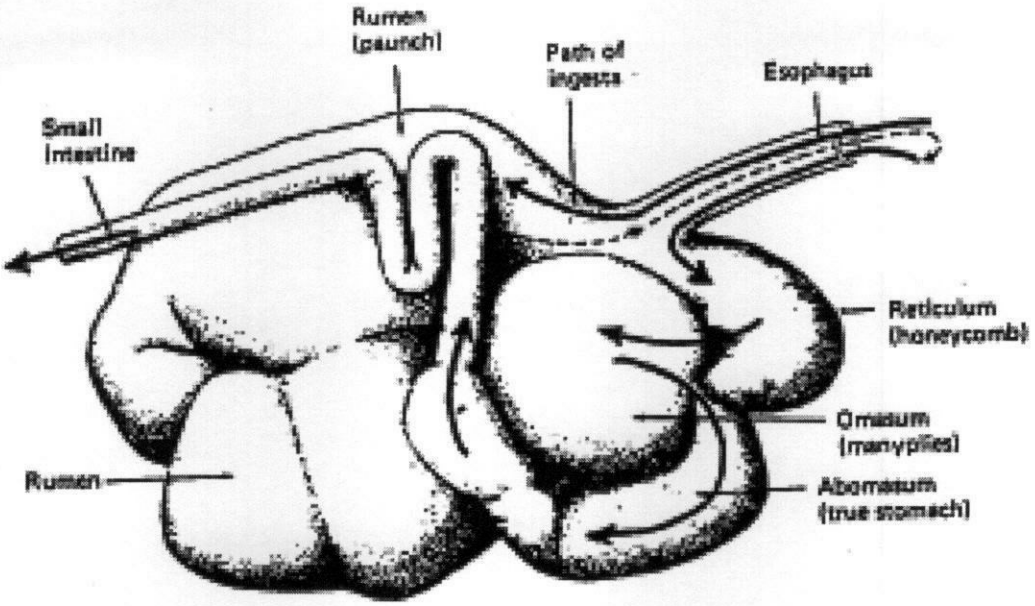
- The primary end products of microbial digestion are the volatile fatty acids: acetic, propionic and buteric
- The ratio of acetic to propionic or A:P ratio reflects the rumen fermentation pattern
- Under optimal rumen fermentation conditions, the A:P should be greater than 2.2:1
- High levels of acetate can indicate a high fiber, low fermentable carbohydrate ration
- High levels of propionic acid can indicate reduced fiber digestion and acidosis
- When the VFA ratios and the levels shift, milk yield and components change
- Acetic acid (acetate) represents 55 to 70 percent of the total VFA production
- Proprionic acid (proprionate) (15-30%) is converted to glucose by the liver, glucose is used to synthesize milk lactose sparing amino acids from gluconeogenesis
- Butyrate (5-15%) is used as an energy source and for milk fat synthesis

  So, in acidosis condition….changing milk components….lower milk fat percentage and higher milk protein percentage and lower milk yield

Table 1

Class	**Carbohydrate Preference**	**Nitrogen Needs**	**Main VFA Produced**	**pH Range**	**Time to DBLE (hr)**
Fiber bacteria	Cellulose Hemicellulose	Ammonia	Acetic Butyric	6.0-6.8	8-10
Starch & Sugar bacteria	Starch Sugar	Ammonia Amino acids	Propionic Lactic	5.5-6.0	1-2

ตารางที่ 2 สรุป VFAs ที่ได้จากการหมัดสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตชนิดต่าง ๆ ในสัตว์เคี้ยวเอื้อง

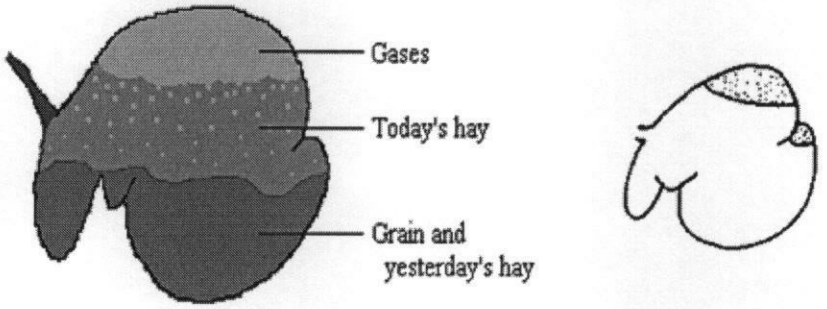


รูปที่ 22 กระเพาะรวม (Compound stomach) ในสัตว์เคี้ยวเอื้องที่โตเต็มวัย

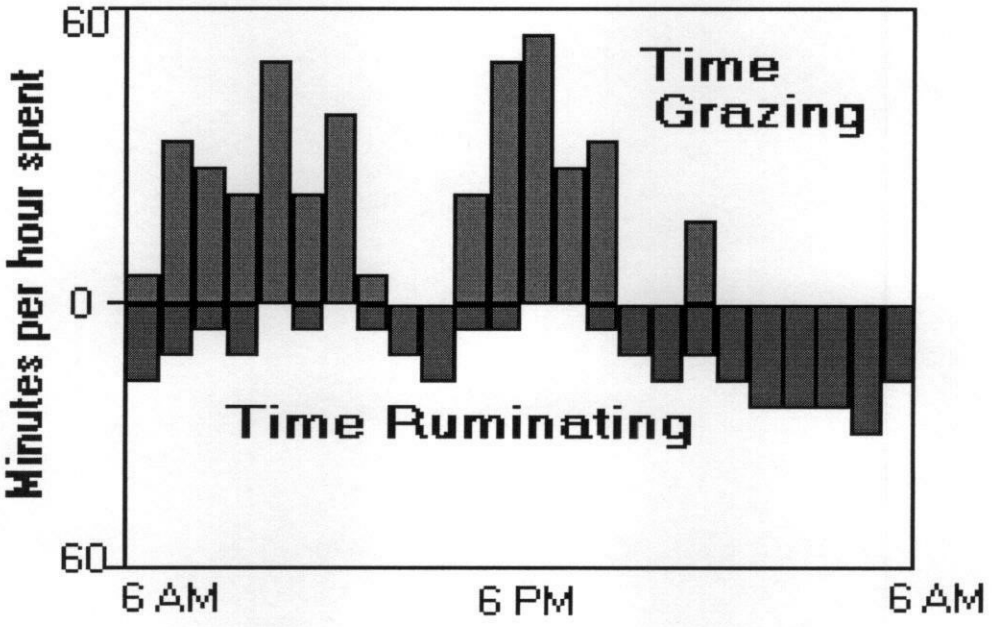
Ruminant Digestion

- Ruminants eat forage rapidly
  - they regurgitate food (cud)
  - and chew it again and swallowed
- Rumination - continuous regurgitation, chewing and swallowing
- Eructation - elimination of gases (methane and carbon dioxide) in the rumen from fermentation

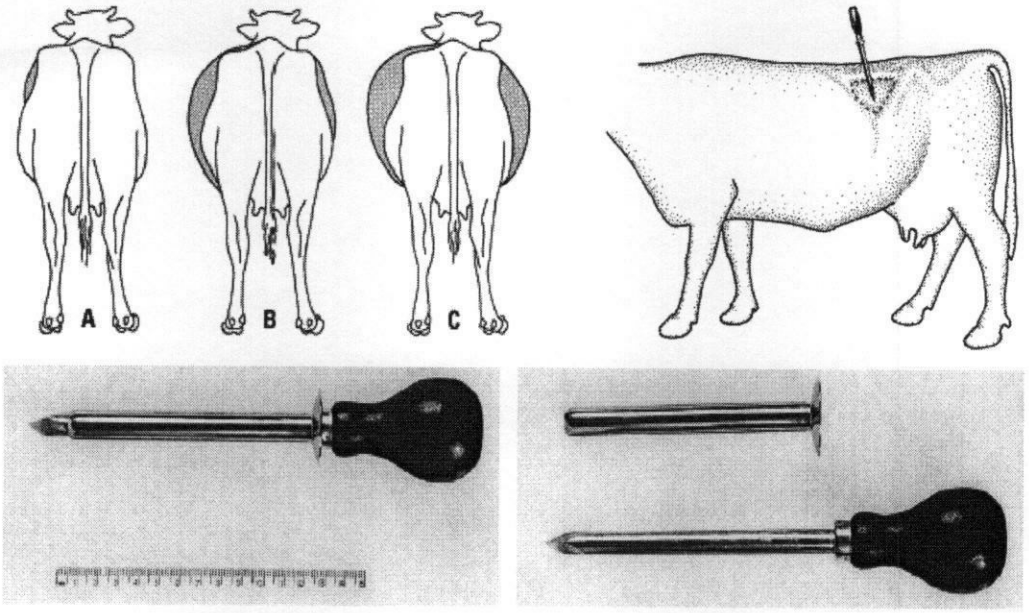
A cycle of contractions occurs 1 to 3 times per minute. The highest frequency is seen during feeding, and the lowest when the animal is resting. Two types of contractions are identified:
Primary contractions originate in the reticulum and pass caudally around the rumen. This process involves a wave of contraction followed by a wave of relaxation, so as parts of the rumen are contracting, other sacs are dilating.
Secondary contractions occur in only parts of the rumen and are usually associated with eructation.



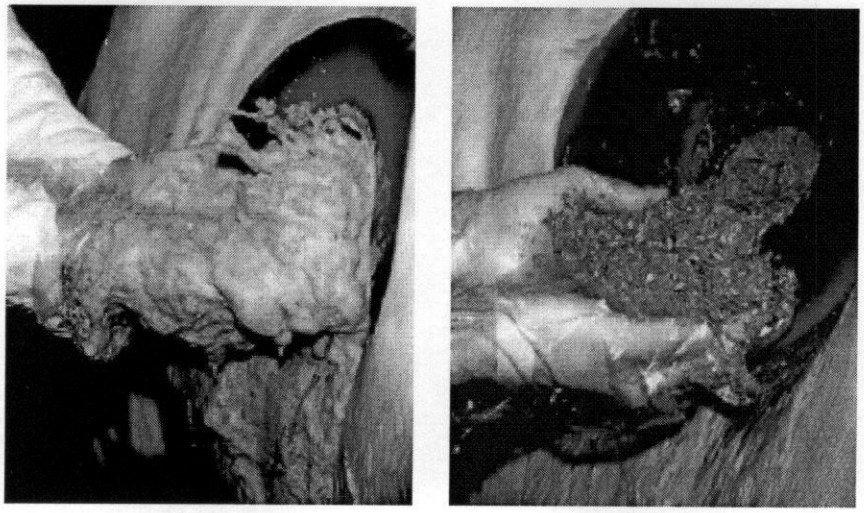
รูปที่ 23 ลักษณะของอาหารและก๊าซใน Rumen



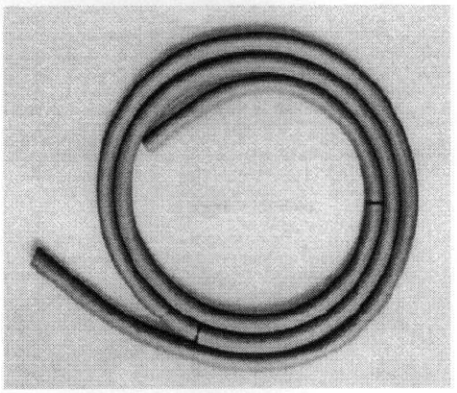
แผนภาพที่ 3 ช่วงเวลาที่ใช้ในการกินอาหารและเคี้ยวเอื้องในแต่ละวันของสัตว์เคี้ยวเอื้อง

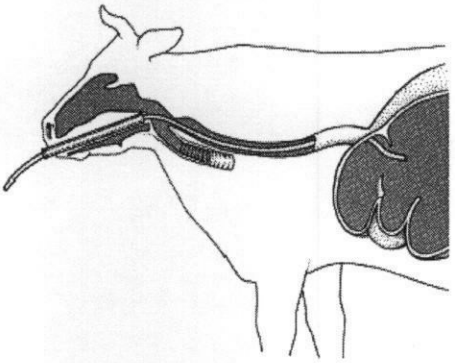


รูปที่ 24 อุปกรณ์และตำแหน่งที่ใช้ในการเจาะกระเพาะ Rumen กรณีโคเกิดท้องอืด (bloat)

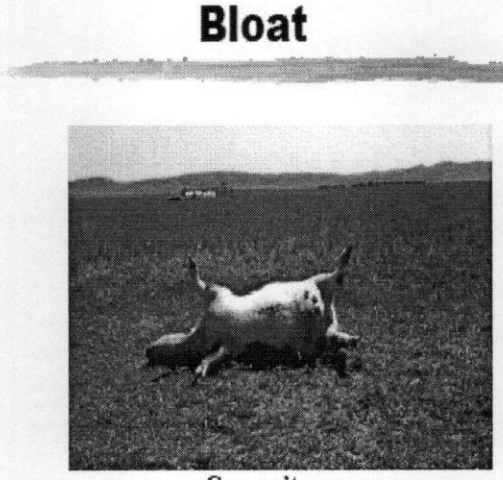


รูปที่ 25 โคเจาะกระเพาะ Rumen และลักษณะของอาหารปกติ (A)
และอาหารกรณีเกิด acidosis (B)





รูปที่ 24 อุปกรณ์และตำแหน่งที่ใช้ในการเจาะกระเพาะ Rumen กรณีโคเกิดท้องอืด (bloat)



รูปที่ 27 ลักษณะของโคที่ตายจากการเกิดท้องอืด (bloat)

การดูดซึม

(absorption)

- **ที่กระเพาะอาหาร (simple stomach)**
  - มีการดูดซึมอาหารประเภทโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตเล็กน้อย
- **rumen, reticulum, omasum**
  - มีการดูดซึม glucose, fatty acid ชนิดสั้น (short chain fatty acid) เช่น acetic, butyric, propionic acid, valeic
- **ลำไส้เล็ก**
  - ดูดซึม amino acid, monosaccharide, fatty acid ชนิดสายยาว เช่น lauric, plamitic, oleic, stearic, glycerol และ vitamin ในรูปสารละลายในน้ำหรือไขมัน

ทางที่อาหารถูกดูดซึมสู่ร่างกาย

- **ทางเลือด (capillary หรือ portal system)**
  - เช่น น้ำตาล, amino acid, mineral, vitamin capillary ของ villi ที่ลำไส้ portal vein ตับ hepatic vein caudal vena cava right atrium of heart body
- **ทางสายน้ำเหลือง (lymphatic system)**
  - เช่น fatty acid, glycerol, vitaminที่ละลายในไขมัน เข้าสู่ต่อมน้ำเหลืองขนาดเล็กที่ villi เข้าสู่ต่อมน้ำเหลืองขนาดใหญ่ เข้าสู่ cranial vena cava หัวใจ
- **ทางเยื่อบุผิว (rumen, reticulum, omasum, abomasum)**
  - เช่น VFA ที่ rumen เป็นส่วนมากที่เหลือดูดซึมที่กระเพาะอีก 3 ส่วน, ammonia

ขบวนการดูดซึมอาหาร

- **Active Transport**
  - อาศัยพลังงานในการดูดซึม (จากที่มีความเข้มข้นน้อย ที่มีความเข้มข้นมากกว่า เช่น การดูดซึมน้ำตาล)
- **Passive Transport**
  - ดูดซึมจากที่มีความเข้มข้นมาก ที่มีความเข้มข้นน้อย เช่น การดูดซึมวิตามิน

การเคลื่อนไหวของระบบทางเดินอาหาร

- **การกลืน** (ถูกควบคุมโดยศูนย์การกลืนที่ floor of fourth ventricle ของ brain stem)
- แบ่งออกเป็น 3 ระยะ คือ

  - ระยะที่ 1 (Voluntary State) จาก bolus ลิ้นผลักเอาก้อนอาหารเข้าสู่ลำคอ พร้อมกับเพดานอ่อนถูกยกขึ้น ระยะนี้อยู่ภายใต้อำนาจจิตใจบังคับได้

  - ระยะที่ 2 (Pharyngeal State) อาหารกระตุ้น pressure receptor ที่ลำคอทำให้เกิด reflex ของการกลืนต่อๆไปของ feed เข้า esophagus ซึ่งฝาปิดกล่องเสียงจะปิดกล่องเสียงทำให้หยุดหายใจชั่วขณะ

  - ระยะที่ 3 เกิด reflex peristalsis ของหลอดอาหารผลักดันให้อาหารเคลื่อนลงสู่กระเพาะอาหาร
- **หลอดอาหาร**
  - peristalsis
- **กระเพาะอาหาร** (simple stomach) แบ่งเป็น 2 portion
  - proximal region storage อาหาร สามารถขยายตัวให้มีขนาดใหญ่กว่าปกติ (adaptive relaxation)
  - distal region บดย่อยและส่งอาหารเข้าไปในลำไส้เล็ก peristalsis จาก middle ของ stomach ไปยับยั้ง pyrolus และเมื่อคลื่น peristalsis เข้ามาใกล้กับ pyrolus จะเกิดการหดตัวของ pyrolus เพื่อปิดกั้นอาหารไม่ให้ออกสู่ลำไส้เล็ก อาหารที่มีขนาดเล็กลงเท่านั้น (<2 mm) จึงจะสามารถผ่านออกไปยังลำไส้เล็กได้ อาหารที่มีขนาดโมเลกุลขนาดใหญ่จะถูกบดย่อยต่อไป

การควบคุมการหดตัวของ stomach

- Neuronal Control

ANS → Vagus Nerve → Proximal Region ····→ Relaxation

ANS → Vagus Nerve → Distal Region → Peristalsis

- Endocrine Control

CNS → Vagus Nerve → เมื่อสัตว์เห็นอาหาร → เกิดการหดตัวของกระเพาะอาหาร

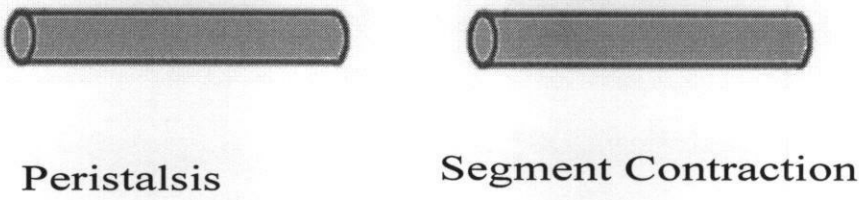
แผนภาพที่ 4 การควบคุมการหดตัวของกระเพาะอาหาร (Stomach)

การเคลื่อนไหวของกระเพาะรวม

- **rumen**
  - หดตัว 1.8 ครั้ง/นาที หรือ 2 ครั้งใน 3 นาที
  - ผิดปกติไม่มีการบีบตัวหรือหดตัวช้า
- **reticulum**
  - หดตัวเพื่อช่วยในการสำรอกอาหารเพื่อเคี้ยวเอื้อง
- **omasum**
  - บดอาหาร ผลักดันอาหารเข้าสู่ abomasum
- **abomasum**
  - หดตัวคล้ายใน simple stomach

ลำไส้เล็ก

- **Digestive Period (หลังจากกินอาหาร)**
  - Mixing Contraction (non-propulsive, segmentation contraction) เป็นการหดตัวที่มีลักษณะคล้ายไส้กรอก เพื่อคลุกเคล้าอาหารกับน้ำย่อยและช่วยทำให้สารอาหารสัมผัสกับผนังลำไส้อย่างทั่วถึง
  - Peristalsis เกิดขึ้นในระยะสั้นๆ เกิดสลับกับ mixing contraction



รูปที่ 28 การหดตัวทางเดินอาหารแบบ Peristalsis และแบบ Segmentated Contraction

- **Interdigestive Period**
  - เป็นการเคลื่อนที่แบบ peristalsis เป็นระยะทางไกลๆ หรืออาจเกิดโดยตลอดความยาวของลำไส้เล็กเลย (migrating motility complex)
  - หน้าที่เพื่อกวาดระบายเอาเศษอาหารที่เหลือจากการย่อยออกไปจากลำไส้เล็ก
  - ขณะที่ลำไส้เล็ก peristalsis ileocecal sphincter จะคลายตัว (อาหารลำไส้ใหญ่)

ลำไส้ใหญ่

- **caecum** บีบตัวพลักอาหารเข้าใน colon และอาหารจะถูกผลักดันเข้ากลับมาใน caecum อีกโดยการเคลื่อนที่แบบ antiperistalsis ของ colon เป็นการคลุกเคล้าอาหาร เพื่อให้มีการดูดซึมน้ำและ electrolytes ได้ดียิ่งขึ้น
- **colon**
  - segmentation movement บดอาหาร อาหารสัมผัสกับผนังลำไส้มากขึ้นทำให้การดูดซึมน้ำแร่ธาตุเกิดได้เร็วขึ้น
  - peristalsis ช่วยผลักดันอาหารไปทาง rectum
  - antiperistalsis เกิดขึ้นบ่อยๆเพื่อช่วยการบดอาหารและดูดซึมอาหาร
  - mass peristalsis หดตัวแบบ peristalsis แต่ลักษณะการหดตัวเกิดขึ้นกว้างกว่า peristalsis ปกติ เกิดขึ้นขณะถ่ายอุจจาระ

การเคลื่อนไหวของทางเดินอาหารในสัตว์ปีก

- **หลอดอาหาร (esophagus) และ crop**
  - peristalsis
- **Gastrointestinal motility**
  - proventriculus มีการหดบีบตัวแบบ peristalsis
  - Gizzard มีการหดบีบตัวของกล้ามเนื้อ 2 ชุด คือ thin & thick muscle ภายในมีก้อนกรวดช่วยบดอาหาร
  - Duodenum มีการหดตัวแบบ peristalsis และ antiperistalsis
- **ileal, colonic and cecal motility**
  - การบีบตัวของ ileum, colon และ cecum มีลักษณะคล้ายคลึงกันในสัตว์กระเพาะเดี่ยวที่ cecum ของสัตว์ปีกมีขนาดค่อนข้างยาวพบการบีบตัวแบบ mixing, peristalsis และ antiperistalsis

อาเจียน

(vomiting or imesis)

- vomiting center อยู่ที่ medullar of longata ซึ่งจะรับ nerve impulse จาก chemoreceptor ที่ผนังกระเพาะอาหาร ลำไส้และส่วนท้ายของลิ้น
- กระบวนการอาเจียน
  - การปิดของ epiglottis ทำให้หลอดลมปิด

- soft palate ยกตัวขึ้นไปปิดที่ naso pharynx
- การหดตัวของกล้ามเนื้อท้อง กระบังลม การคลายตัวของกระเพาะอาหารและ cardiac sphincter
- ไม่พบในม้า

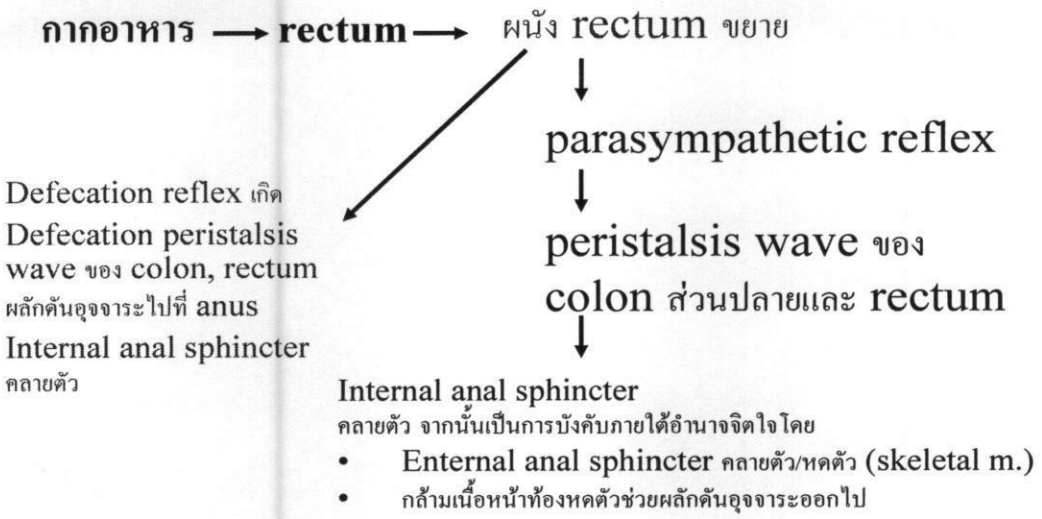
การสำรอกอาหาร
(Regurgitation)

- ruminant จะสำรอกอาหารออกมาเคี้ยวเอื้อง
  - เป็น reflex เกิดจากการหดตัวของ reticulum และการหดตัวของกล้ามเนื้อหายใจเข้าอย่างทันที พร้อมทั้งมีการปิดของฝาปิดกล่องเสียง ทำให้ pressure ในช่องอกลดลงทำให้ esophagus ในส่วน thoracic part ขยายออก เข้าสู่ esophagus ที่ช่องอก ปาก
  - การกระตุ้นให้เกิดการสำรอกอาหารเพื่อเคี้ยวเอื้องอาจเกิดจากอาหารที่มีลักษณะหยาบไปสัมผัสกับผนังของ rumen
  - รับความรู้สึกและสั่งการผ่านทาง vagus nerve โยมีศูนย์กลางการเคี้ยวเอื้องอยู่ที่ medullar oblongata ทำให้เกิด reflex ของการเคี้ยวเอื้อง

การเรอ
(Eructation หรือ Belching)

- พบใน ruminant
- เกิดขึ้นเพื่อกำจัด gas (CO_2 & CH_4) ที่เกิดจากขบวนการ fermentation ออกไปทางปาก เพื่อป้องกันการเกิดท้องอืด (bloat)

การถ่ายอุจจาระ (Defecation)



แผนภาพที่ 5 กลไกการถ่ายอุจจาระ (Defecation)

ท้องผูก

(constipation)

- อาหารที่กินเข้าไปไม่มีกากอาหารทำให้การบีบตัวเคลื่อนไหวของลำไส้ใหญ่ลดลง
- กากอาหาร (fiber) ปริมาณมากทำให้ผนังลำไส้ใหญ่ขยายตัว เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการหดตัวเคลื่อนไหวของลำไส้ใหญ่
- กากอาหาร (fiber) ปริมาณน้อยทำให้การหดตัวเคลื่อนไหวของลำไส้ใหญ่ลดลงเกิดการสะสมของอุจจาระในลำไส้ เกิดท้องอืด

ท้องร่วง

(diarrhea)

- อะไรก็ตามที่ทำให้เกิดการระคายเคืองของลำไส้
- อาจเกิดจาก
  - การทำลายผนังลำไส้ของ bacteria, virus
  - การมีพยาธิในระบบทางเดินอาหาร
  - การไม่มี enzyme ที่ใช้ย่อยอาหาร เช่น กินนมแล้วท้องเสีย

- irritation peristalsis ขับเศษอาหารออกมา ท้องเสีย
- ปกติในลำไส้ดูดซึมอาหาร น้ำ แร่ธาตุ
- ท้องเสีย สูญเสียสารอาหารที่ควรจะได้รับ น้ำ แร่ธาตุ

การดูดซึมโมเลกุลขนาดใหญ่ของลูกสัตว์แรกเกิด

- ภูมิคุ้มกันโรค (antibody) มี 2 แบบ
  - active immunity
  - passive immunity
- พบในส่วน blood serum โดยเป็นโปรตีนโมเลกุลใหญ่
  - IgG, IgM, IgA
- ในลูกสัตว์ เคี้ยวเอื้อง สุกร ม้า ต้องได้รับผ่านทาง colostrum
- โดยปกติ antibody จะถูกทำลายโดยน้ำย่อยในระบบทางเดินอาหาร ดังนั้นในลูกสัตว์แรกเกิดระบบทางเดินจะยังไม่หลั่งน้ำย่อย หรือกรดที่จะทำลาย antibody
- ภายใน 24-36 ชั่วโมง

ความผิดปกติของกระเพาะในสัตว์เคี้ยวเอื้อง

- **Reticulitis (Hardware disease)**
  - เป็นภาวะที่มีสิ่งแปลกปลอมเข้าไประคายเคืองหรือทำให้เกิดบาดแผลใน reticulum
- **Ruminal acidosis**
  - high-roughage ratio high-grain ratio ทำให้สัตว์ปรับตัวไม่ทัน จะทำให้เกิด ruminal acidosis และเกิด atony (rumen หยุดการเคลื่อนไหว)
  - microflora ใน rumen ปรับตัวไม่ทัน
  - ทำให้ pH lactic acid
  - ประชากรแบคทีเรีย และ protozoa เปลี่ยนแปลง
  - rumen หยุดเคลื่อนไหว
- **Acute tympany (Bloat)**
  - เป็นลักษณะการสะสมของ gas ใน rumen
  - เกิดจากการ feed ด้วย legume pasture, alfafa หรือ clover
  - การสะสมของ gas มักเกิดจากการมี frothing มาก (trapping ของ gas ใน ingesta)
  - เกิด foam ขณะ rumination ขัดขวางการระบาย gas ออกมาโดยขบวนการ eructation

- gas สะสมภายใน rumen
- อาหารพวก soluble protein ใน หญ้าสด saponin salivary mucoprotein และพวก bacteria ที่สร้าง slime ทำให้เกิด bloat ได้
- รักษาโดยการให้ antifoaming agent เช่น oil หรือสารเคมีที่เป็น surfactant

- **Parakeratosis ของ rumen**
  - เมื่อ ratio ของอาหารผ่านขบวนการ (processed food) มาก เช่น ให้พวก pellet จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะของ epithelium ของ rumen โดย papillae ของ rumen จะขยายใหญ่และแข็งแรงมากขึ้น ลักษณะที่เปลี่ยน lesion เช่นนี้เรียกว่า parakeratosis
- **Diarrhea (scours)**

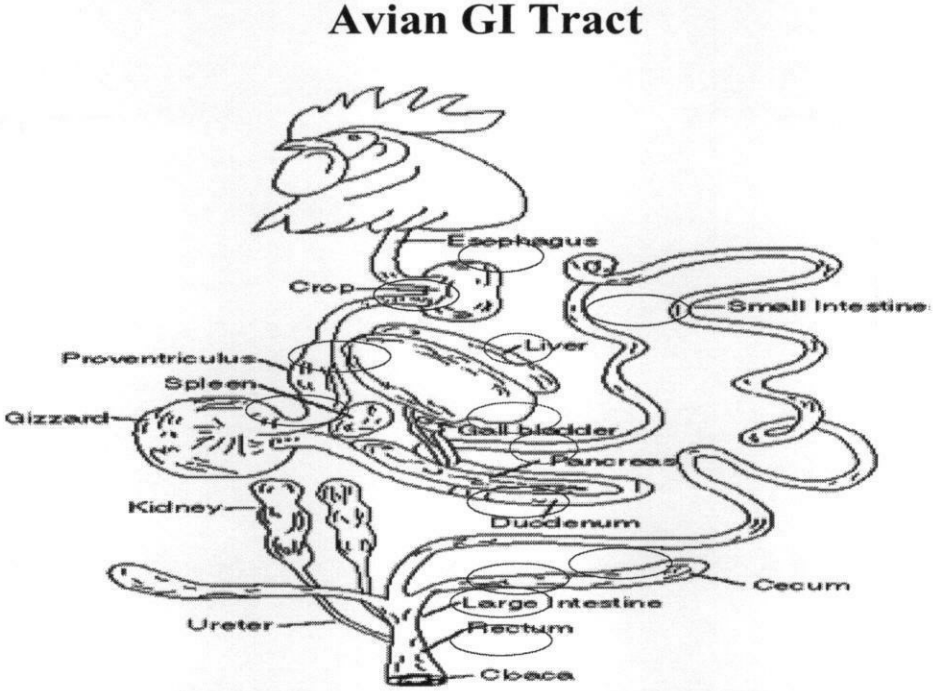
การควบคุมการกินอาหาร

(Regulation of food intake)

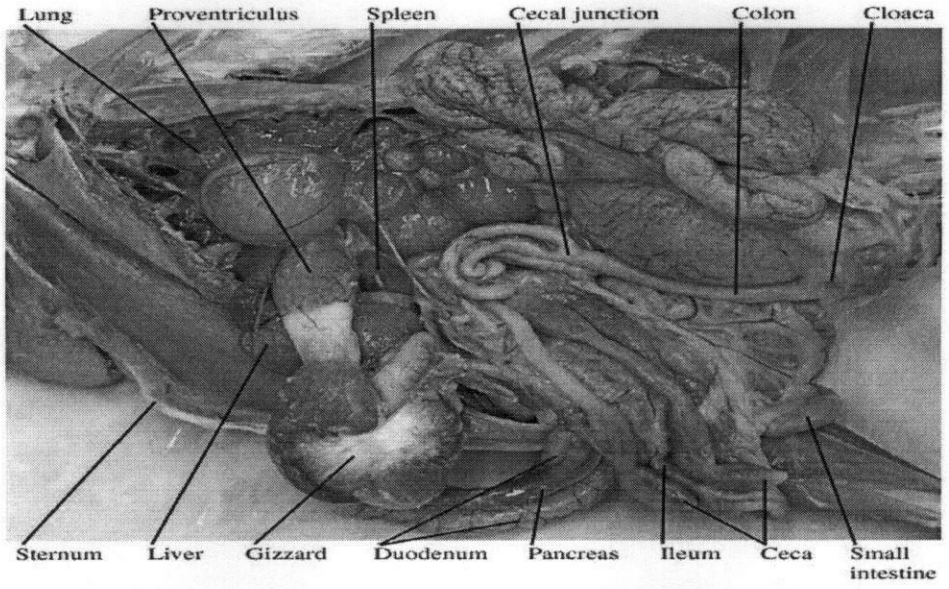
- เหมือนกันทั้งสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมและในสัตว์ปีก
- มีศูนย์ใน hypothalamus เป็นตัวควบคุม appetite
- ถ้ามี lesion ที่ ventromedial hypothalamus สัตว์จะกินอาหารไม่หยุด (hyperphagia)
- ถ้ามี lesion ที่ lateral hypothalamus สัตว์จะไม่กินอาหาร (aphagia)

ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการกินอาหารในสัตว์ปีก

- ปัจจัยที่ทำให้สัตว์กินอาหารลดลง
  - อุณหภูมิแวดล้อมสูงกว่าปกติ
  - ให้อาหารที่มีพลังงานสูง
- ปัจจัยที่ทำให้สัตว์กินอาหารเพิ่มขึ้น
  - อุณหภูมิแวดล้อมลดต่ำลง
  - ระยะออกไข่ (egg production)
  - ระยะผลัดขน (molting)



รูปที่ 29 ภาพจำลองระบบทางเดินอาหารในสัตว์ปีก (ไก่)



รูปที่ 30 ระบบทางเดินอาหารและระบบสืบพันธุ์ในไก่เพศเมีย

การเคลื่อนไหวของทางเดินอาหาร

- **การจับอาหารเข้าปากและการกลืน**
  - ใช้ beak จับอาหารเข้าปาก
  - อาหารจะคลุกเคล้าในช่องปากแล้วถูกกลืนลงไป
  - ขบวนการกลืนอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก และ negative pressure ใน esophagus ช่วยดูดอาหารลงไป
  - การยืดคอและยกหัวเป็นกลไกสำคัญในการกลืน
- **esophagus & crop motility**
  - อาหารจะเคลื่อนผ่าน esophagus โดย peristalsis
  - ภาวะการหดตัวของกระเพาะในขณะที่อาหารถูกกลืนลงมาจะเป็นตัวบ่งชี้ว่าอาหารจะถูกส่งไปยัง crop หรือ กระเพาะอาหาร
  - ถ้าไปยัง crop อาหารจะถูกพักและทำให้ชุ่มน้ำและอ่อนนุ่ม จากนั้นจะเคลื่อนไป proventriculus
  - การเคลื่อนอาหารจาก crop ไป proventriculus จะเป็น reflex ที่ควบคุมโดยการเต็มของกระเพาะอาหาร

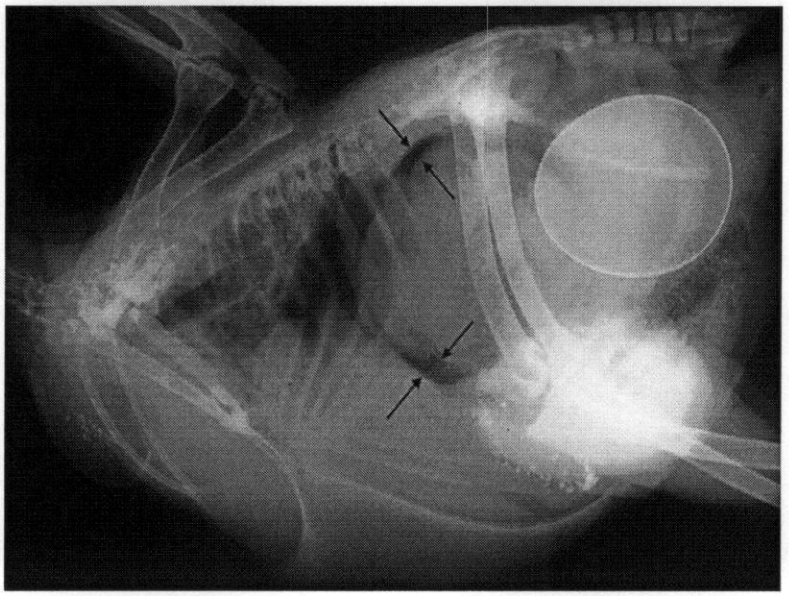
    อัตราความเร็วของอาหารที่ผ่านไปจะขึ้นกับคุณสมบัติของอาหาร
  - ได้แก่ consistency, hardness, water content
  - อาหารเละจะผ่าน crop ได้เร็วกล่าอาหารแห้ง
  - สัตว์อายุมากการเคลื่อนที่จะช้ากว่าอายุน้อย การเคลื่อนที่ของอาหารจะเร็วที่สุดในไก่รุ่นและไก่ไข่ ช้าที่สุดใน ไก่กกไข่
- **Gastroduodenal motility**
  - การเคลื่อนอาหารย้อนกลับทางปาก มี 2 แบบ
    - reflux ของอาหารใน duodenum และ upper ileum ไปสู่ gizzard เกิดขึ้น 4 ครั้ง/ชม. ในไก่งวง ทำให้เกิดการคลุกเคล้าผสมของอาหารในลำไส้กับน้ำย่อยในกระเพาะอีก
    - ในนกล่าเหยื่อจะขย้อน (egest) เศษกระดูก ขนของเหยื่อออกมาจากกระเพาะ
  - ความหิวหรือการอดอาหารจะทำให้ความถี่ในการหดตัวของกระเพาะของสัตว์ปีกลดลง

grit หรือก้อนกรวดที่กินเข้าไปไม่มีความสำคัญต่อการย่อยปกติ แต่จะสำคัญต่ออาหารที่แข็งและย่อยช้า ย่อยยาก โดยปกติสัตว์ปีกจะกิน grit เสมอ

การดูดซึม

- การดูดซึมสารอาหารจากลำไส้
  - การดูดซึมเกิดขึ้นเร็วเนื่องจากมี metabolic rate สูง
  - ที่ upper ileum ดูดซึม end product ของ fat, carbohydrate, protein
  - ที่ lower ileum ดูดซึม bile salt
  - สัตว์ปีกจะดูดซึมไขมันเข้าสู่กระแสเลือดโดยตรงไม่ต้องผ่าน ระบบน้ำเหลือง ของ villi แบบในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

grit



รูปที่ 31 ภาพเอ็กซ์เรย์ก้อนกรวด (grit) ในกระเพาะบด (Gizzard) ของสัตว์ปีก

เอกสารประกอบการสอน

วิชา 303 318 Animal Physiology and Anatomy II

เรื่อง

ระบบขับถ่ายปัสสาวะ

(The Urinary System)

โดย

อาจารย์นายสัตวแพทย์ ดร. ภคนิจ คุปพิทยานันท์
ส.พบ., M.Res., Ph.D. (*Physiology*)

สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำนำ

เอกสารประกอบการสอนนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนวิชา 303 318 Animal Physiology and Anatomy ให้กับนักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์ชั้นปีที่ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หวังว่าเอกสารนี้จะเป็นประโยชน์ต่อนักศึกษาและผู้สนใจทั่วไป

อ.น.สพ.ดร. ภคนิจ คุปพิทยานันท์

ตุลาคม 2548

ระบบขับถ่ายปัสสาวะ

เนื้อหาประกอบด้วย

- **ส่วนประกอบสำคัญพื้นฐานของการทำงานของไต**
- **การกรองที่ glomerulus (glomerular filtration) และกลไกการควบคุมตัวเอง**
- **การประเมินการทำงานของไต**
  - **GRF**
  - **Clearance**
- **การทำงานของท่อไต**
  - **Tubular reabsorption**
  - **Tubular secretion**
  - **องค์ประกอบของปัสสาวะ**
- **สมดุลน้ำในร่างกาย**
- **การทำปัสสาวะให้เจือจาง-เข้มข้นและการถ่ายปัสสาวะ**
- **Note for avian urinary system**

ส่วนประกอบสำคัญพื้นฐานของการทำงานของไต

- **หน้าที่ของไต**
- **โครงสร้างของไต**
- **การสร้างน้ำปัสสาวะ**

หน้าที่ของไต

(Renal functions)

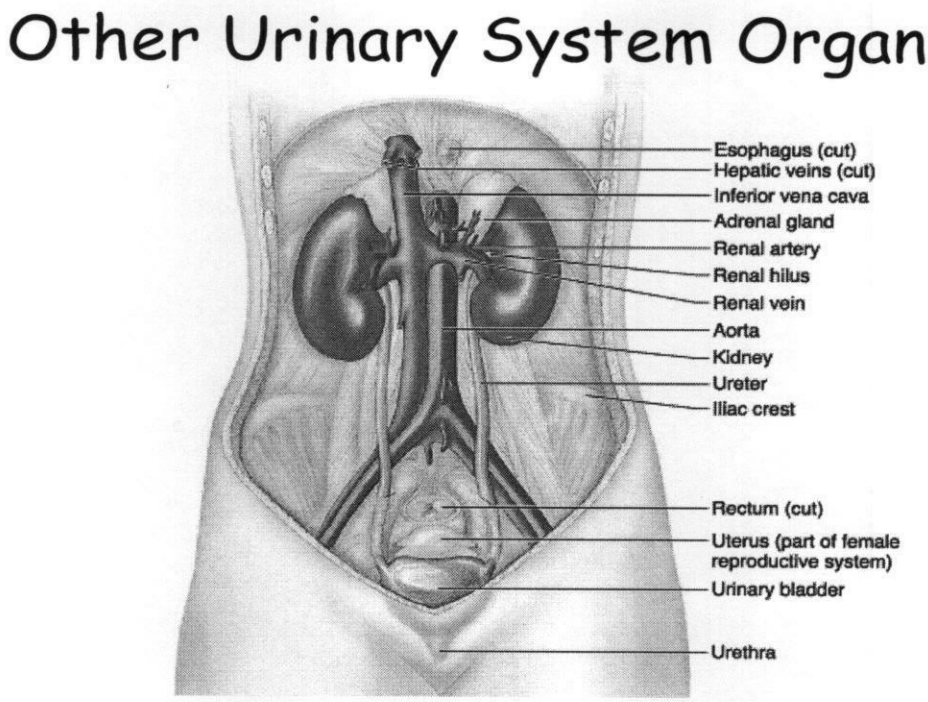
1. ควบคุมสมดุลน้ำและเกลือแร่ต่างๆในร่างกาย
2. ขับของเสียที่เกิดจาก metabolism ของสารอาหาร ฮอร์โมน และสารแปลกปลอม protein (N); liver; ammonia (toxic)-----> ammonia (aquatic animals), urea (mammals & amphibians), uric acid (avian & reptilians)
3. ควบคุมสมดุลกรด-ด่าง
4. ทำหน้าที่เหมือนต่อมไร้ท่อ หลั่งฮอร์โมน
   - Erythropoietin

- Renin
- Calcitriol

5. สร้างน้ำตาล glucose (gluconeogenesis)

โครงสร้างของไต

- เป็นอวัยวะคู่ 1.รูปร่างคล้ายเมล็ดถั่ว(human, pig, cat, dog) 2. multiple lobes (ruminants (cattle), poultry (3 lobes))
- เมื่อผ่าตามยาวเนื้อไตแบ่งออกเป็น 2 ชั้น
  - เนื้อไตชั้นนอก (cortex)
  - เนื้อไตชั้นใน (medulla)
    - External medulla
    - Internal medullar จะรวบรวมน้ำปัสสาวะเข้าสู่กรวยไต (renal pyramids) ท่อไต (ureter) และกระเพาะปัสสาวะ
- เนื้อไตทั้ง 2 ชั้นประกอบด้วยหน่วยย่อยของไตที่ทำหน้าที่ในการสร้างน้ำปัสสาวะเรียกว่า nephron
- พบหลอดเลือดและหลอดน้ำเหลือง



รูปที่ 1 อวัยวะในระบบขับถ่ายปัสสาวะของมนุษย์

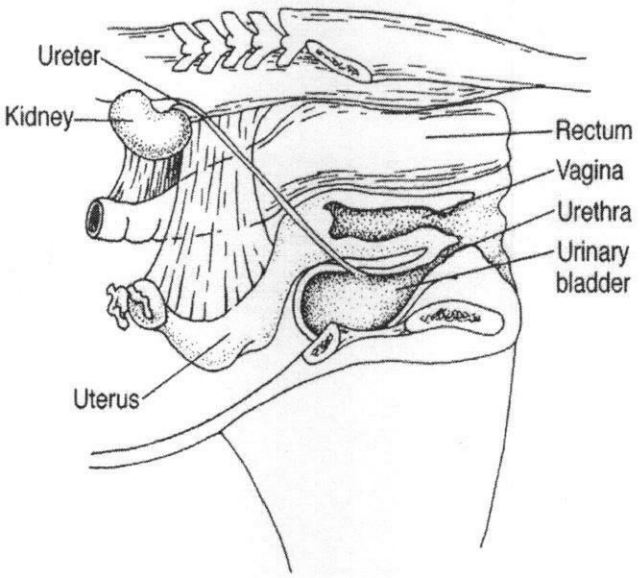
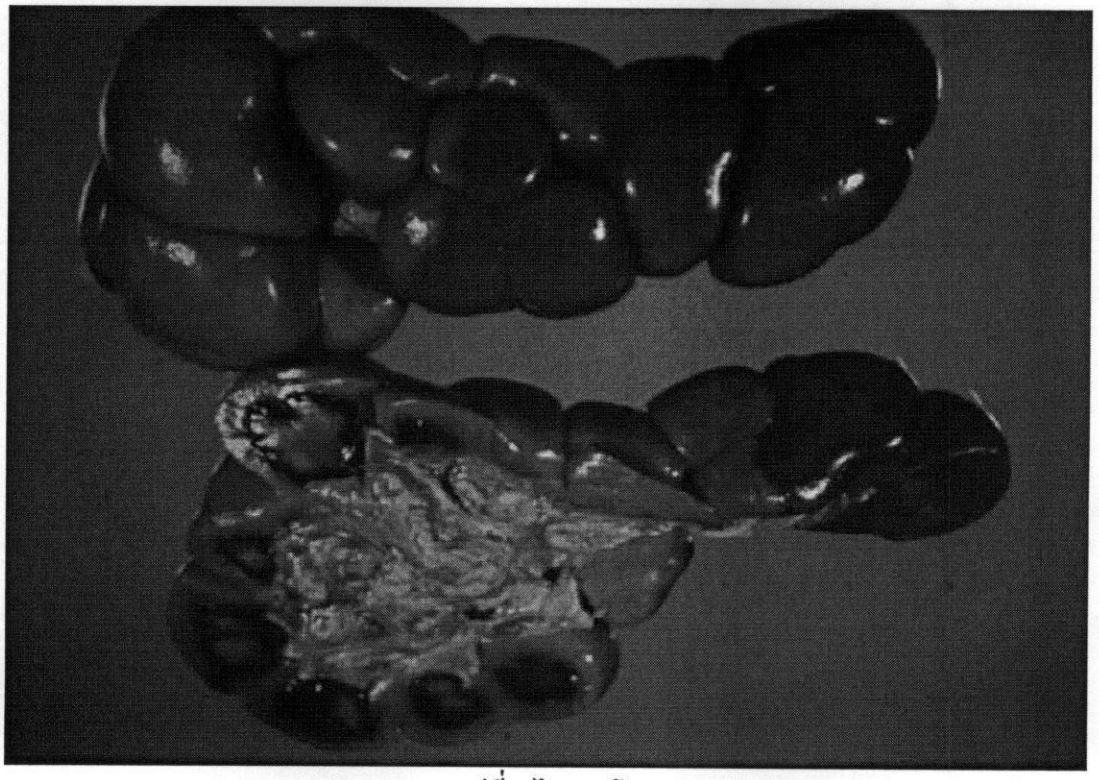


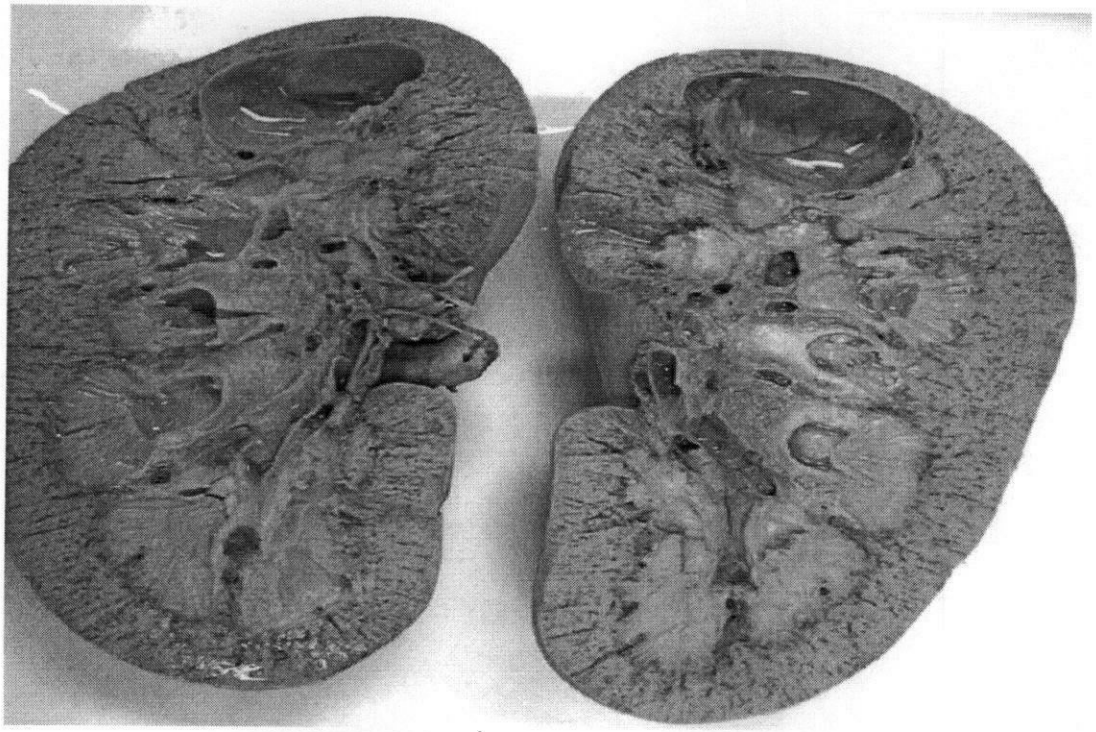
Figure 23-5. Kidneys, ureters, and urinary bladder in situ in the small ruminant. (Reprinted with permission from Reece W.O. *Physiology of Domestic Animals.* 2nd ed. Baltimore: Williams & Wilkins, 1997.)

รูปที่ 2 อวัยวะในระบบขับถ่ายปัสสาวะของสัตว์เคี้ยวเอื้อง



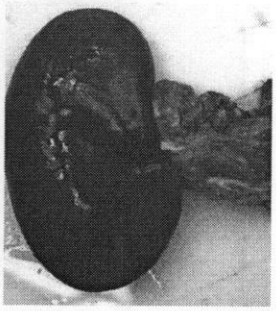
รูปที่ 3 ไตของโค

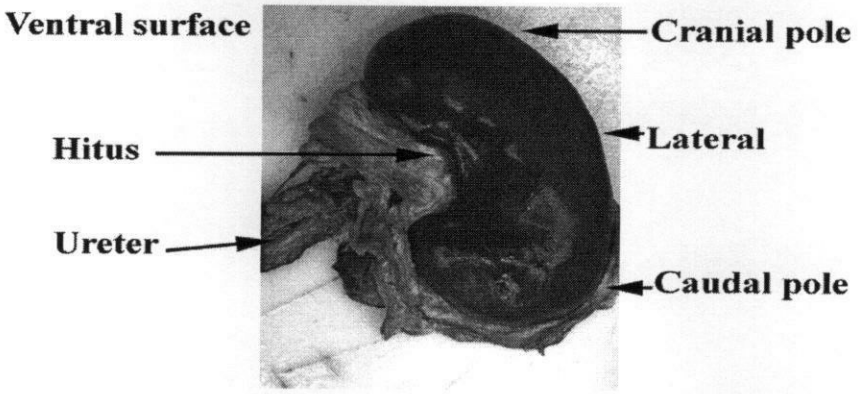
Human



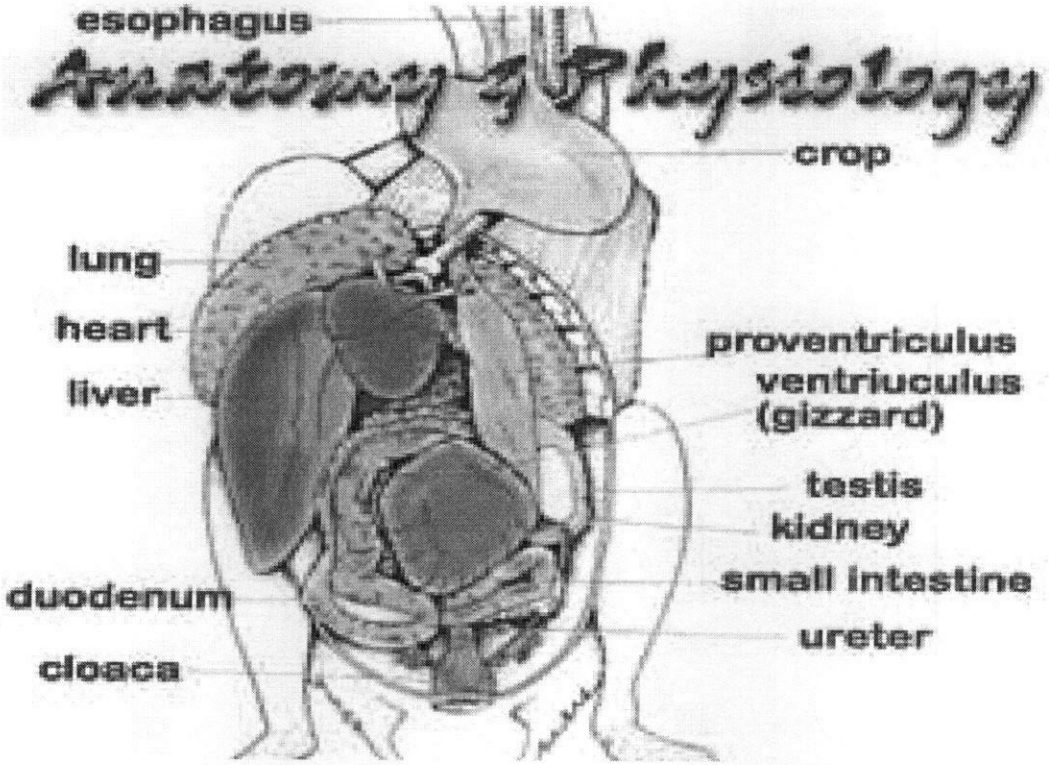
รูปที่ 4 ไตของมนุษย์

Swine



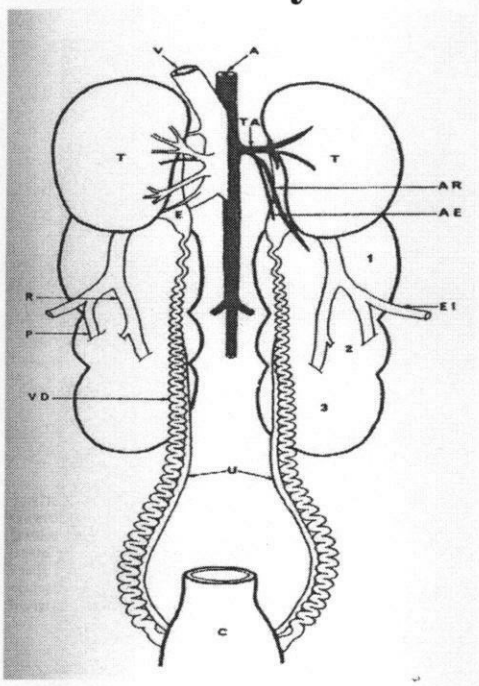


รูปที่ 5 ไตของสุกร



รูปที่ 6 ไต (Kidney) ของสัตว์ปีก

Poultry



รูปที่ 7 ไตของสัตว์ปีก

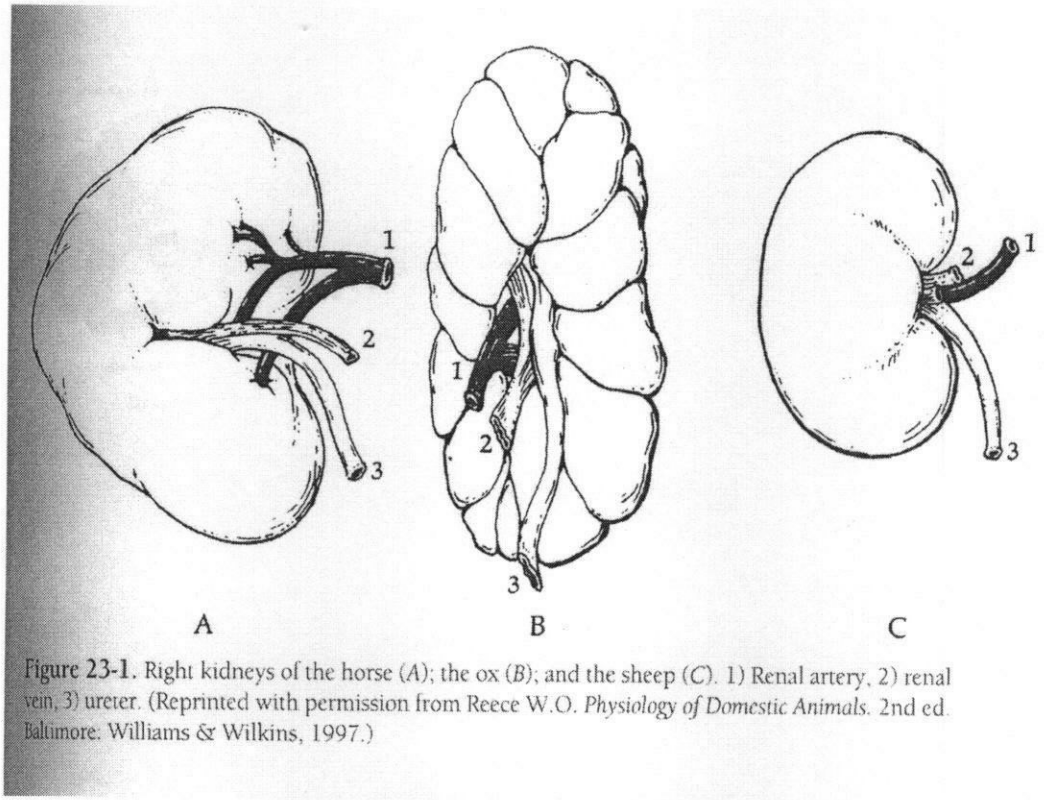
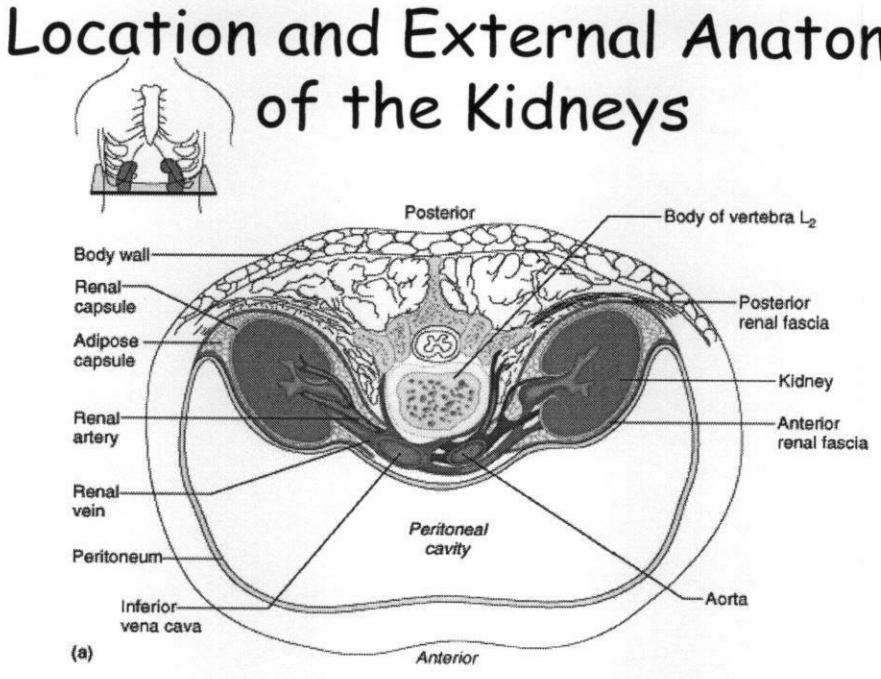


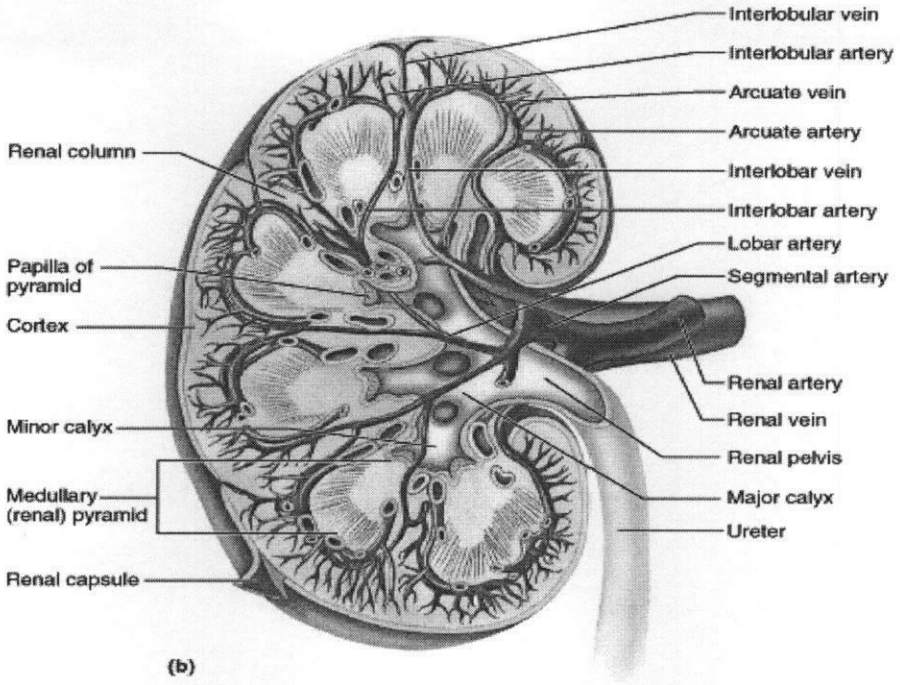
Figure 23-1. Right kidneys of the horse (*A*); the ox (*B*); and the sheep (*C*). 1) Renal artery, 2) renal vein, 3) ureter. (Reprinted with permission from Reece W.O. *Physiology of Domestic Animals.* 2nd ed. Baltimore: Williams & Wilkins, 1997.)

รูปที่ 8 ไตของม้า, โค และแกะ



รูปที่ 9 ตำแหน่งของไตในมนุษย์

โครงสร้างของไต



รูปที่ 10 โครงสร้างภายในของไต

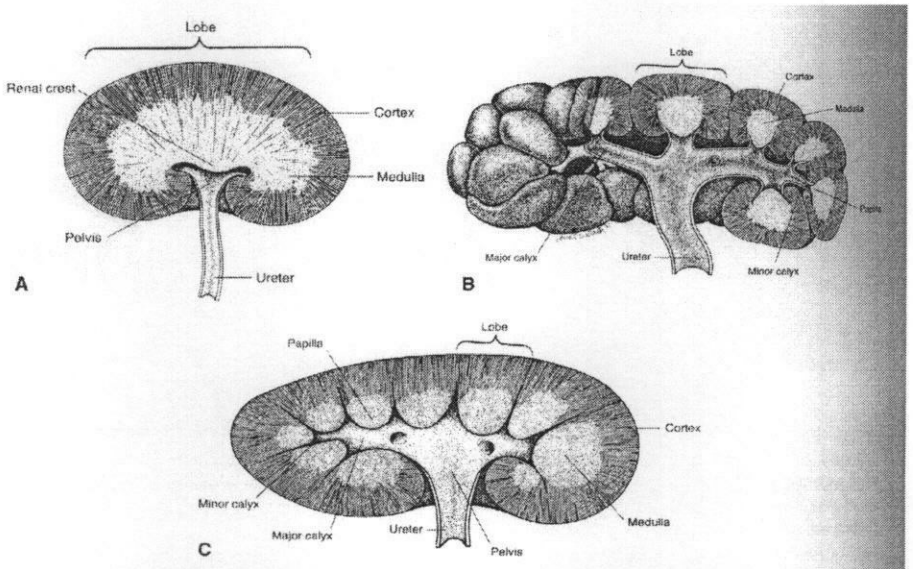


Figure 23-2. Internal anatomy of kidneys. *A*) The renal cortex of the equine, ovine, and caprine kidney lacks visible divisions into individual lobes. The renal papillae are fused in these species into a longitudinal renal crest. *B*) The bovine kidney is grossly divided into lobes, each of which communicates with a minor calyx. *C*) The porcine kidney lacks external divisions into lobes, but the renal papillae of the medulla distinguish each lobe internally. (Reprinted with permission from Dellman H.D. *Textbook of Veterinary Histology*. 4th ed. Philadelphia: Lea & Febiger, 1993.)

รูปที่ 11 โครงสร้างภายในของไตในสัตว์ชนิดต่าง ๆ (A ม้า, B โค, C สุกร)

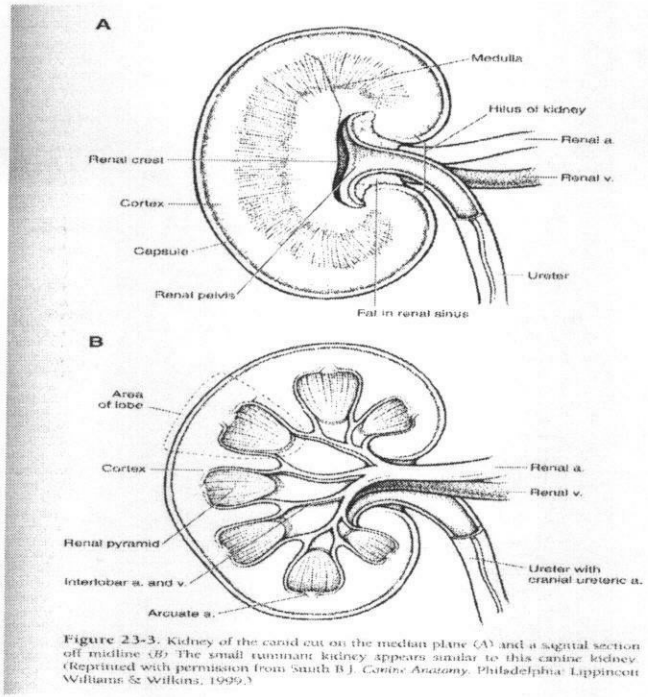


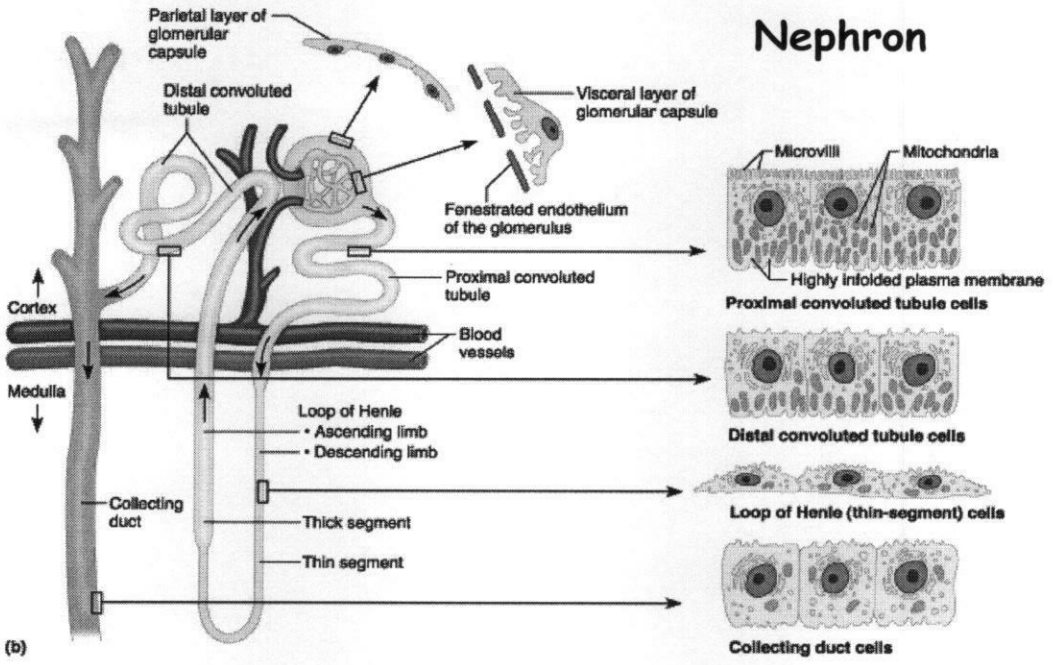
Figure 23-3. Kidney of the canid cut on the median plane (*A*) and a sagittal section off midline (*B*). The small ruminant kidney appears similar to this canine kidney. (Reprinted with permission from Smith B J. *Canine Anatomy*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 1999.)

รูปที่ 12 โครงสร้างภายในของไตใน Small Ruminant

The Nephron (หน่วยไต)

ประกอบด้วย 2 ส่วน

1. ส่วนของหลอดเลือด (Renal corpuscle) ทำหน้าที่เกี่ยวกับการกรอง
   - Glomerulus เป็นกลุ่มหลอดเลือดฝอย ทำหน้าที่กรองน้ำและสารบางอย่างจากพลาสมาเข้ามาในไต
   - Bowman's capsule เป็นถุงหุ้ม glomerulus ถือว่าเป็นส่วนต้นของท่อไต
2. ส่วนของท่อไต (Renal tubule) เป็นท่อกลวงผนังประกอบด้วย epithelial cell ชั้นเดียว ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของของเหลวที่กรองได้ก่อนออกมาเป็นปัสสาวะ
   - Proximal tubule
   - Loop of Henle (ascending & descending segment)
   - Distal tubule
   - Collecting tubule



รูปที่ 13 หน่วยไต (Nephron)

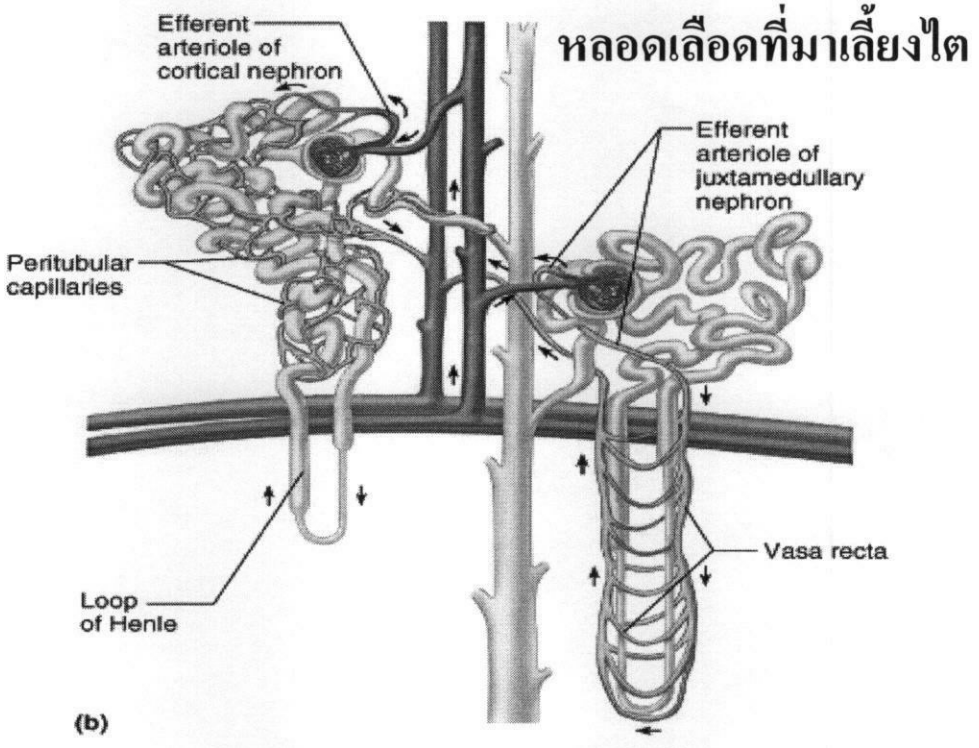
โครงสร้างของเซลล์บุท่อไต

- **Proximal tubule**
  - ทำหน้าที่ในการดูดซึมกลับและขับออกสารต่างๆที่ใช้และไม่ใช้พลังงาน เยื่อที่ติดกับด้านโพรงของท่อไต (apical membrane) จะมีลักษณะคล้ายนิ้วมือ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซึม ด้านที่ติดกับหลอดเลือด (basolateral membrane) จะมี mitochondria อยู่เป็นจำนวนมากเป็นแหล่งจ่ายพลังงาน
- **Loop of Henle (ascending & descending segment)**
  - มี mitochondria อยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีการขนถ่าย Na+, K+, Cl- แบบ ใช้พลังงาน
  - ทำหน้าที่เกี่ยวกับการทำให้ปัสสาวะเจือจาง-เข้มข้น
- **Distal tubule & Collecting tubule**
  - เซลล์เยื่อบุมีการพัฒนาน้อยกว่าท่อไตส่วนต้น
  - มี principal cells
    - ทำหน้าที่ดูดซึมน้ำกลับ & Na+ ขับ K+
    - มี mitochondria อยู่ทั่วไป

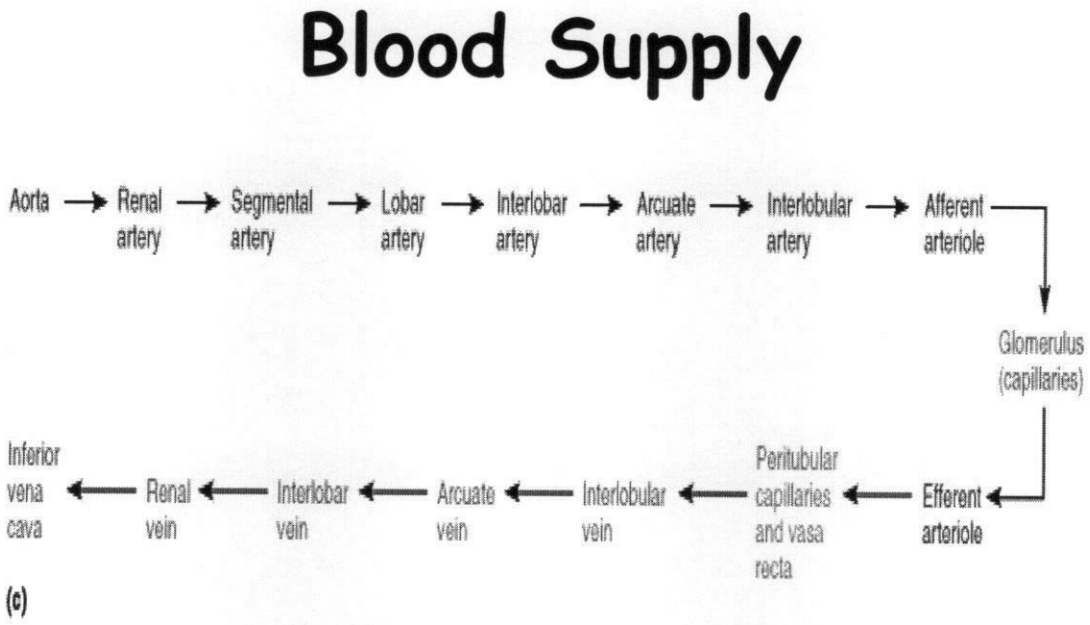
- & intercalated cells
    - มี mitochondria มาก
    - ทำหน้าที่หลั่ง H+ เข้าสู่ท่อไต และขนถ่าย K+ & ไบคาร์บอเนต จากท่อไตเข้าสู่เลือด

หลอดเลือดที่มาเลี้ยงไต

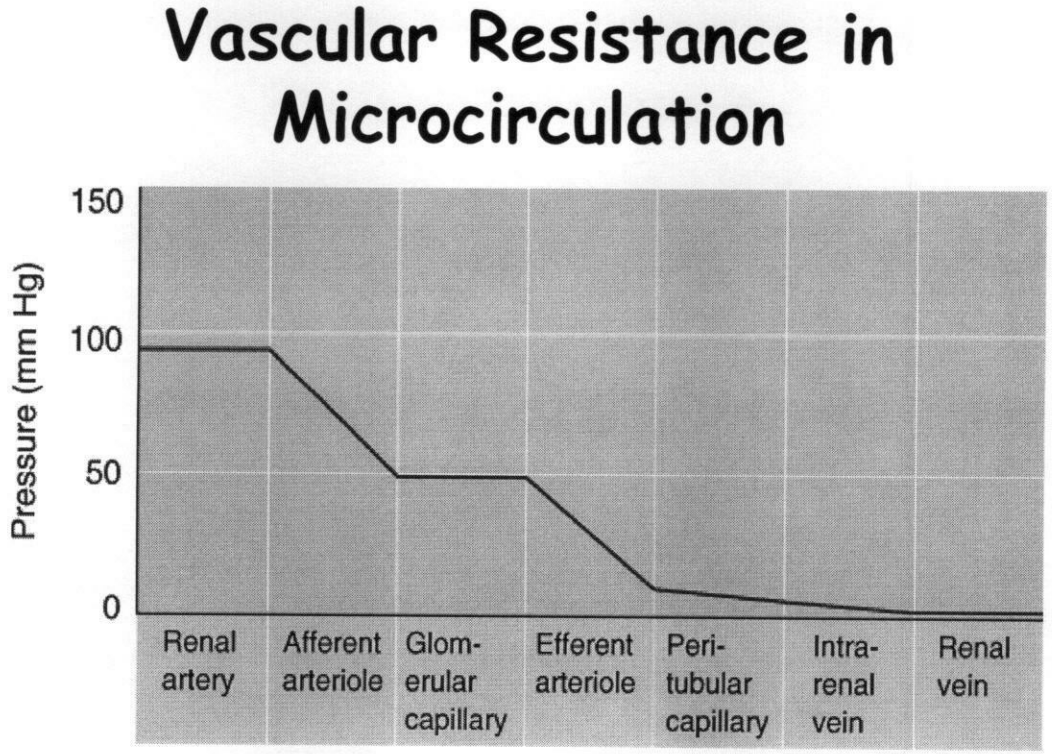
- เลือดเข้าสู่ไต 25% ของเลือดทั้งหมดที่ออกจากหัวใจในเวลา 1 นาที
- (= 1,200 ml/min, human)
- > สมอง หรือ หัวใจ เนื่องจากร่างกายต้องนำของเสียหรือน้ำส่วนเกินมาขับทิ้งที่ไต
- หลอดเลือดที่มาเลี้ยงที่ไต
    - **Renal artery**
    - **Afferent arteriole**
    - **Efferent arteriole**
    - **Peritubular capillaries**
    - **Vasa recta**



รูปที่ 14 หลอดเลือดที่มาเลี้ยงไต



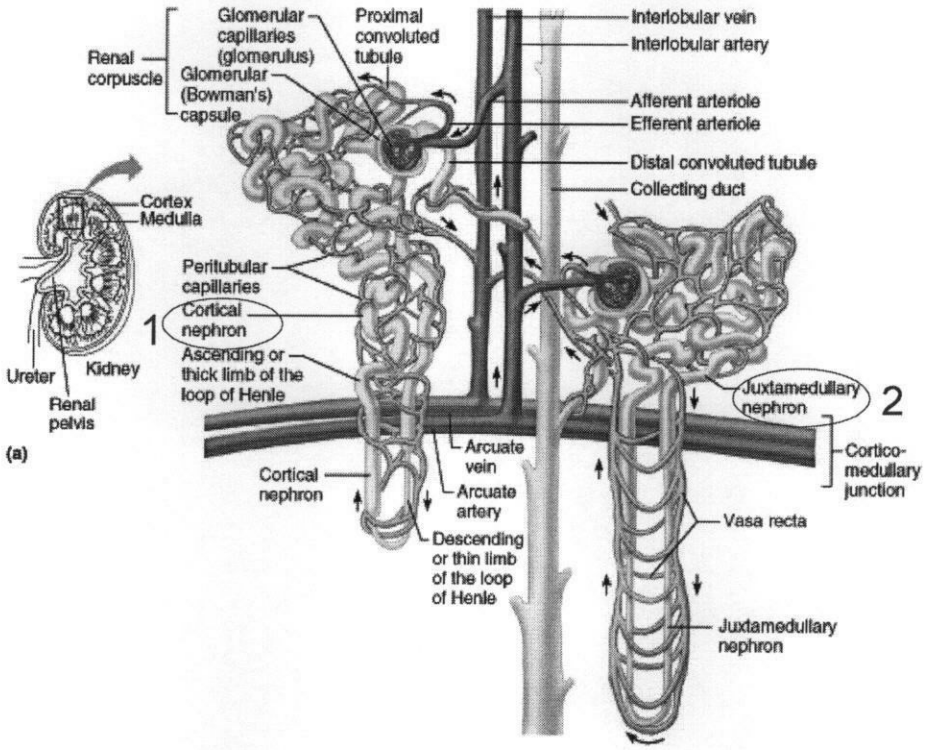
แผนภาพที่ 1 ลำดับของเส้นเลือดแดงและเส้นเลือดดำที่มาเลี้ยงไต



แผนภาพที่ 2 ความดันเลือดในหลอดเลือดต่าง ๆ ที่มาเลี้ยงไต

ชนิดของ Nephron

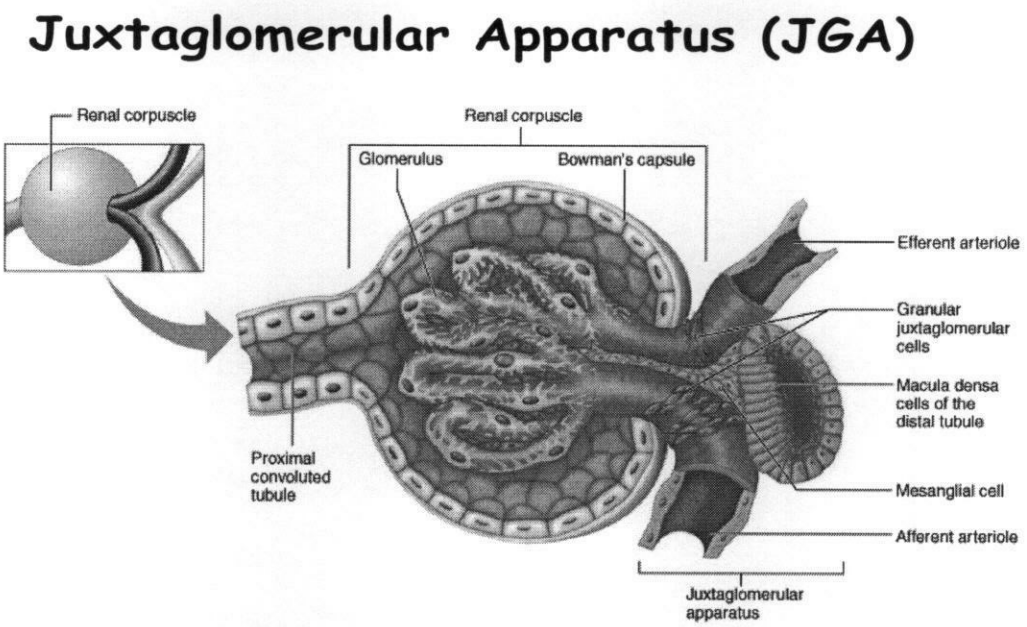
1. **Cortical nephron**
    - 80% ของท่อหน่วยไต
    - มี renal corpuscle วางตัวอยู่ในชั้น cortex
    - ท่อไตรูปตัว u มีขนาดสั้น มีหลอดเลือดฝอยพันรอบท่อหน่วยไต (Peritubular capillaries)
2. **Juxtamedullary nephron**
    - 15-20% ของท่อหน่อยไต
    - มี renal corpuscle ใหญ่ วางตัวอยู่ในชั้น cortex ใกล้กับ medulla
    - มีหลอดเลือดฝอยพันรอบท่อหน่วยไต (vasa recta)



รูปที่ 15 ชนิดของหน่วยไต (Nephron) 1 Cortical Nephron, 2 Juxtamedullary Nephron

Juxtaglomerular Apparatus (JGA)

1. Granular cells
    - เป็นตัวรับรู้การเปลี่ยนแปลงความดันโลหิต (baroreceptor)
2. Macula densa cells
    - เป็นตัวรับรู้การไหลของเหลวในท่อไตหรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ NaCl (chemoreceptor)
3. Extraglomerular mesangial cells
    - แทรกอยู่ระหว่าง efferent & afferent ทำหน้าที่ phagocytosis



รูปที่ 16 Juxtaglomerular Apparatus (JGA)

การสร้างน้ำปัสสาวะ

(Urine Formation)

- ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน
    1. การกรองที่โกลเมอรูลัส (glomerular filtration)
    2. การดูดซึมกลับที่ท่อไต (tubular reabsorption)
    3. การขับออกที่ท่อไต (tubular secretion)

- อัตราที่สารถูกขับทิ้งในปัสสาวะ = อัตราที่สารถูกกรอง + อัตราที่สารถูกขับออก – อัตราที่สารถูกดูดซึมกลับ

Ex. ในคน มี plasma ที่ถูกกรองที่ โกลเมอรูลัส = 180 L. แต่มีปัสสาวะถูกขับออกเพียง 2 L. ดังนั้น อัตราการดูดกลับ = 99%

การกรองที่โกลเมอรูลัส (glomerular filtration)

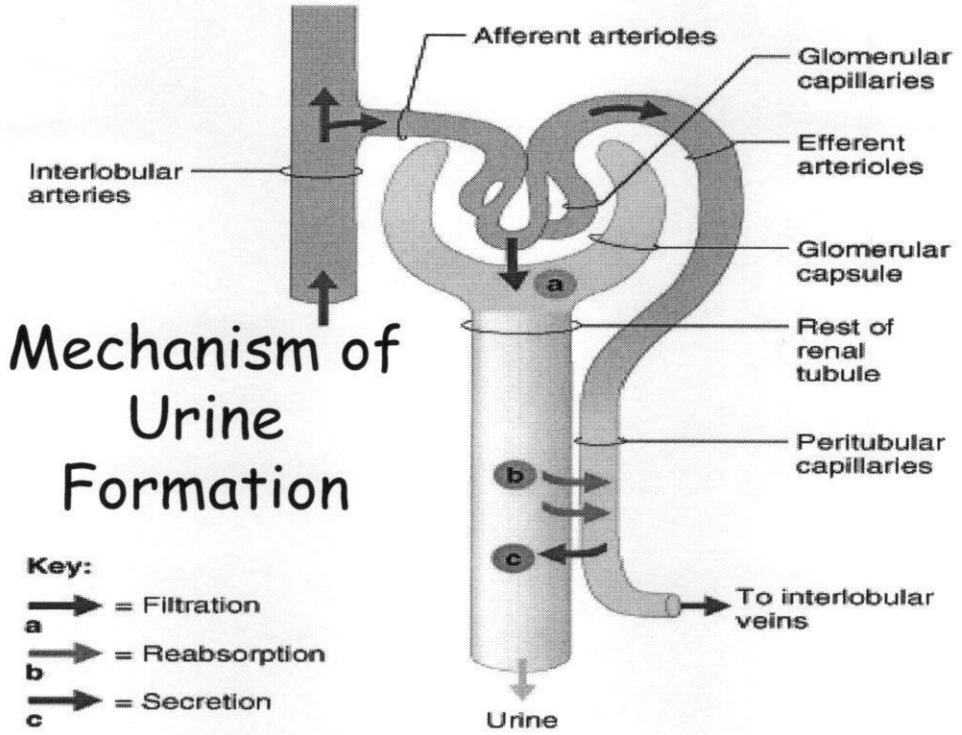
- เป็นขั้นแรกของการสร้างปัสสาวะ
- plasma และสารละลายถูกกรองผ่าน โกลเมอรูลัส เข้ามาในช่องว่างโบว์แมนส์
- ไม่ต้องใช้พลังงาน
- ของเหลวที่กรองได้เรียกว่า glomerular filtrate หรือ ultrafiltrate มีองค์ประกอบคล้ายคลึงกับ plasma แต่ไม่มีเม็ดเลือดแดง โปรตีน และมีความเข้มข้นเท่ากับพลาสมา

การดูดซึมกลับที่ท่อไต (tubular reabsorption)

- เป็นการดูดซึมน้ำและสารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายจากท่อไตกลับเข้าสู่ระบบไหลเวียนทางหลอดเลือดฝอยพันรอบไต
  - Na+
  - Amino acid
  - Glucose

การขับออกที่ท่อไต (tubular secretion)

- เป็นการขนถ่ายสารบางตัวจากหลอดเลือดฝอยที่พันรอบท่อไตเข้าสู่ท่อไต เพื่อขับทิ้งในปัสสาวะ
- เป็น selective process คือจะมีเฉพาะสารบางตัวเท่านั้นที่ถูกขนถ่ายโดยขบวนการนี้
  - H+
  - PAH (p-aminohippuric acid)



รูปที่ 17 กลไกการสร้างปัสสาวะ

การกรองที่โกลเมอรูลัส

(Glomerular Filtration)

- แรงที่ทำให้เกิดการกรอง
  - การกรองเป็นไปตามกฎของ Starling คือแรงที่ทำให้เกิดการกรอง หรือ net filtration pressure (NFP)
  - NFP = แรงที่ทำให้เกิดการกรอง – แรงต้านการกรอง
    = (PGC + πBC) - (PBC + πGC)

PGC = แรงดันของของเหลวใน glomerulus

πBC = แรงดัน oncotic (colloid) ใน Bowman's capsule

PBC = แรงดันของของเหลวใน Bowman's capsule

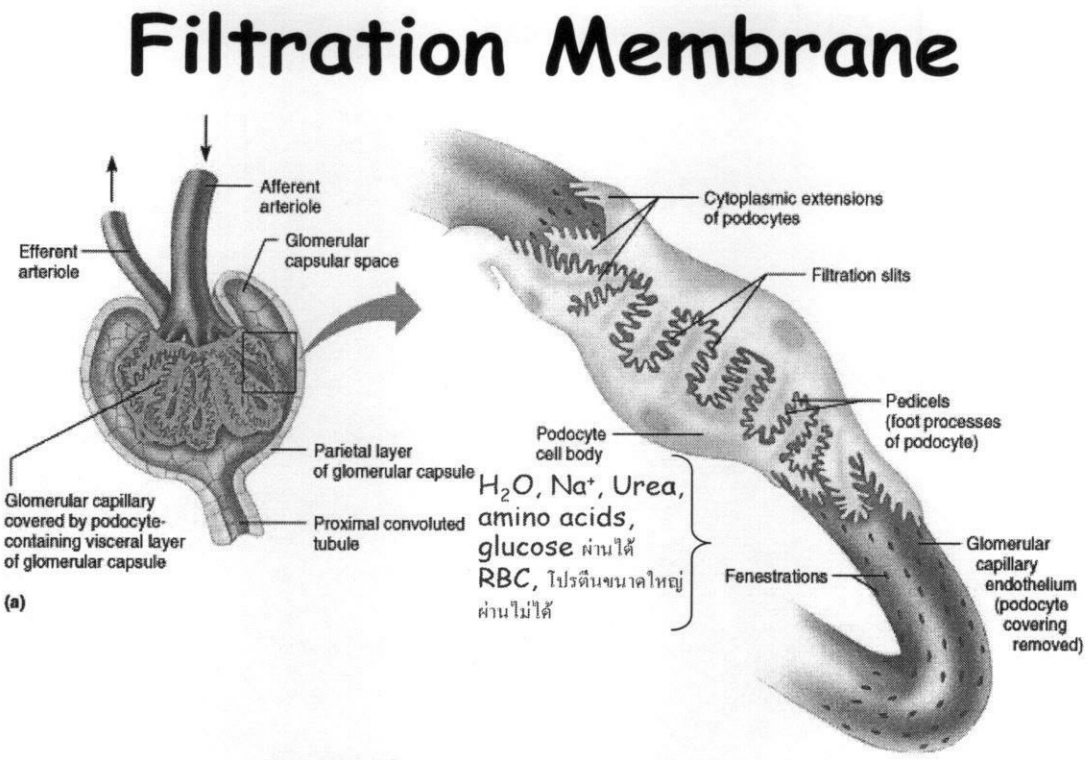
πGC = แรงดัน oncotic (colloid) ในหลอดเลือดฝอยของ glomerulus

= (PGC + πBC) - (PBC + πGC)

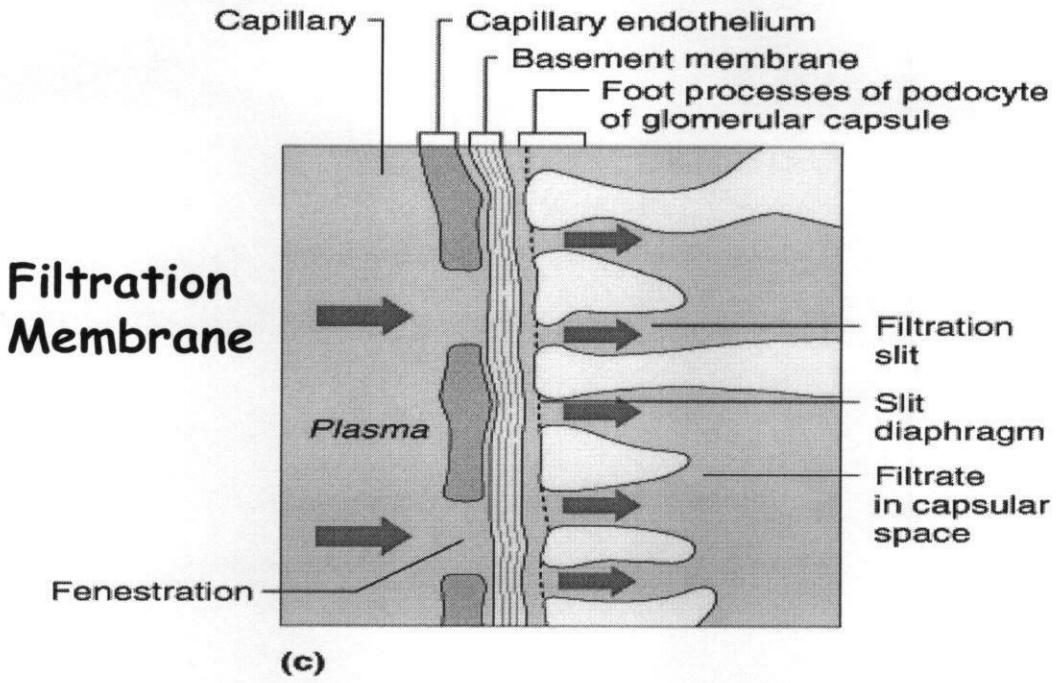
= 60 + 0 - 15 – 28 = 17 mmHg

- ดั้งนั้นแรงดัน 17 mmHG ทำให้เกิดการกรองที่โกลเมอรูลัส ประมาณ 125 ml/min หรือ 180 L./day

- > การกรองที่เส้นเลือดฝอยที่อื่นๆเนื่องจาก
    1. โกลเมอรูลัสมีค่าแรงดันของของเหลวสูงกว่า
    2. โกลเมอรูลัสมีค่าสัมประสิทธิ์ของการกรองสูงกว่า
- องค์ประกอบของสารที่กรองผ่านโกลเมอรูลัสจะคล้ายกับพลาสมา แต่ไม่พบ protein & RBC
- ถ้าผนังโกลเมอรูลัสถูกทำลาย protein จะซึมผ่านได้เรียก proteinuria หรือ albuminuria ถ้ามีการทำลายชั้น endothelium จะพบ RBC เรียก haematuria



รูปที่ 18 Filtration Mambrane



รูปที่ 19 Filtration Mambrane

การหาค่าอัตราการกรอง

(Glomerulus Filtration rate; GRF)

- เป็นปริมาตรของพลาสมาที่ถูกกรองผ่านผนังของโกลเมอรูลัสเข้ามาในช่องว่าง Bowman's capsule ต่อ 1 หน่วยเวลา
- เป็นผลรวมของอัตราการกรองของหน่วยไตทั้งหมด
- Ex. ในคนหนัก 70 kg จะมีค่า GRF = 180 L/day (125 ml/min)
- GRF บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของไต
- GRF ขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ของการกรอง & ผลรวมของแรงที่มากระทำต่อโกลเมอรูลัส (NPF)

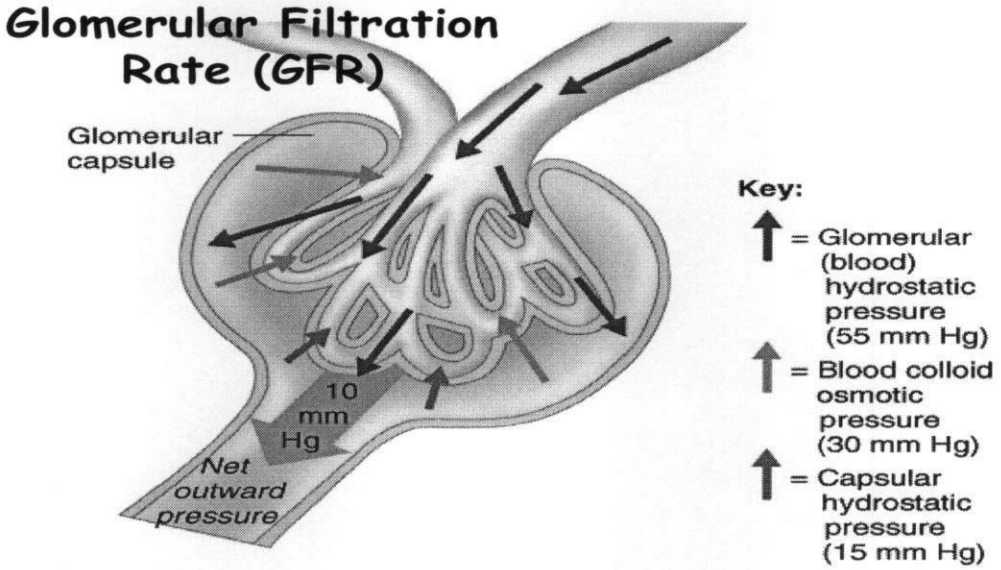
GRF = Kf x NPF

= Kf (PGC - PBC - πGC)

- **ปัจจัยที่มีผลต่อ GRF**

GRF

- Kf เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวการกรอง
- PGC เนื่องจาก
  - ความดันใน renal artery
  - ความต้านทานในหลอดเลือดดำนำเข้า
  - ความต้านทานในหลอดเลือดดำนำออก
- PBC เนื่องจากมีนิ่วหรือการอุดตันในท่อไต
- πGC เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของ protein ในเลือด หรือมี plasma ถูกกรองมากขึ้น



รูปที่ 20 Glomerular Filtration Rate (GFR)

กลไกการควบคุมตัวเอง

(Autoregulation

- ไตมีกลไกการควบคุมตัวเอง โดยการทำให้การปรับเปลี่ยนความต้านทานของหลอดเลือดนำเข้าให้สอดคล้องกับความดันโลหิตที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อควบคุมความดันในโกลเมอรูลัสให้มีค่าคงที่

$Q = \Delta P/R$

Q = ปริมาณเลือดที่ไหลมายังไต

ΔP = ผลต่างของความดันโลหิต

R = ความต้านทานต่อการไหล

- BP < 90 mmHg หรือ >180 mmHg กลไกการควบคุมตัวเองจะเสียไป ทำให้ GFR มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความดันโลหิตที่เปลี่ยนไป
- กลไกการควบคุมตัวเองเกิดจาก
  - กล้ามเนื้อเรียบของหลอดเลือดดำนำเข้า และการควบคุมย้อนกับจากท่อไตและโกลเมอรูลัส

การกำจัดสารทิ้งโดยไต (Renal Clearance)

- 1 min มีพลาสมาถูกกรองที่ไต 125 ml ประมาณ 124 จะถูกดูดกลับที่ท่อไต ดังนั้น 1 min มีปัสสาวะถูกขับทิ้ง 1 ml
- Clearance ของสาร x (Cx)

Cx = (Ux x V)/Px

Cx = Clearance ของสาร x (ml/min)

Px = ความเข้มข้นของสาร x ในพลาสมา (mg/ml)

Ux = ความเข้มข้นของสาร x ในปัสสาวะ (mg/ml)

V = อัตราการไหลของปัสสาวะ (ml/min)

- Ex. จงหาค่า clearance ของสาร x ถ้าพบว่าความเข้มข้นของสาร x ในปัสสาวะ (Ux) มีค่าเท่ากับ 6 mg/ml อัตราการไหลของปัสสาวะ (V) มีค่า 2 ml/min และความเข้มข้นของสาร x ในเลือด (Px) มีค่าเป็น 2 mg/ml

  Cx = (Ux x V)/Px

  Cx = (6 x 2)/2
- สารใดมีประโยชน์ Cx จะต่ำ
- Creatinine Clearance:
  - เป็นสารที่อยู่ในร่างกาย เกิดจาก metabolism ของ creatine ในกล้ามเนื้อลายที่ถูกปล่อยออกมาตลอดเวลาด้วยอัตราคงที่

- Creatine มาจากการกรองส่วนหนึ่งมาจากการขับออกทางท่อไตประมาณ 10% = 6 ml/min

การดูดซึมกลับโดยเซลล์ของท่อไต

(tubular reabsorption)

- มี 2 แบบ

1. Active Transport การขนถ่ายสารจากท่อไตไปยังหลอดเลือดแบบใช้พลังงาน โดยต้านกับความต่างระดับทางไฟฟ้าหรือเคมี
    - Transport maximum (Tm) เช่น การดูดซึมกูลโคส amino acid, vit C, uric, phosphate, sulphate
    - Gradient-time limitation เช่น Na+
2. Passive transport การดูดซึมกลับของสารแบบไม่ใช้พลังงาน เกิดขึ้นตามลำดับความเข้มข้นของไฟฟ้าและเคมี จากความเข้มข้นมากไปยังความเข้มข้นน้อย
    - Cl-, คาร์บอเนต, urea, น้ำ

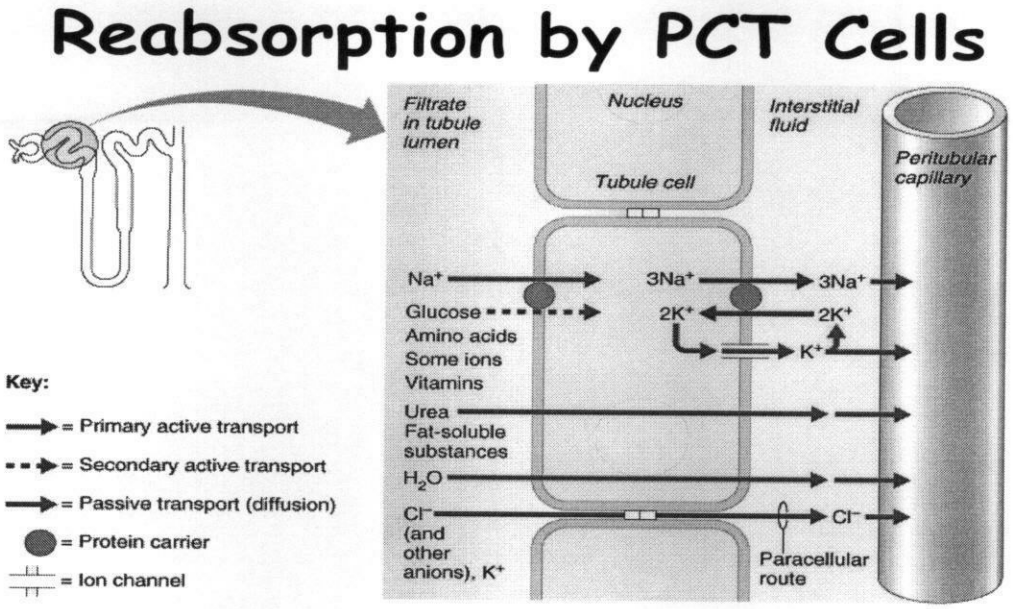
Transport maximum (Tm)

- ค่า Tm ของสารใดๆหมายถึง ปริมาณสารที่มากที่สุดที่สามารถถูกขนถ่ายได้โดยเยื่อบุท่อไตใน 1 หน่วยเวลา ต้องอาศัยตัวพา
- การขนส่งแบบนี้มีขีดจำกัด อยู่ที่ปริมาณสารที่ถูกกรอง คือถ้าปริมาณสารที่ถูกกรองเข้ามามีมากเกินความสามารถที่ตัวพาจะนำเข้าสู่เลือดได้หมด ปริมาณสารที่มีค่า Tm ของสารนั้นๆจะถูกขับทิ้งออกมาในปัสสาวะ
- Glucose, amino acid, vit C, uric, phosphate, sulphate

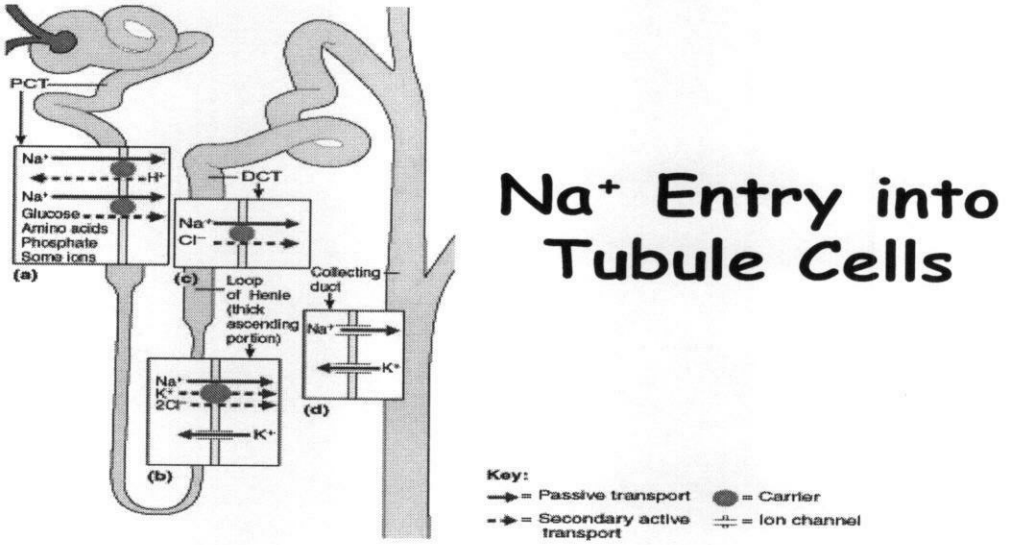
Gradient-time limitation

- การขนถ่ายสารจากท่อไตไปยังหลอดเลือดนอกจากจะขึ้นกับลาดความเข้มข้นของสารยังขึ้นกับเวลาที่ของเหลวสัมผัสกับเซลล์ท่อบุไต
- Na+, K+

เกิดที่ท่อไตส่วนต้น



รูปที่ 21 การดูดกลับของสารต่าง ๆ โดย PCT Cells



รูปที่ 22 กลไกการเคลื่อนที่ของ Na^+ เข้าสู่ท่อไตส่วนต่าง ๆ

การขับออกที่ท่อไต

(Tubular Secretion)

- มี 2 แบบ

1. Active Transport

   - Transport maximum (Tm)

     - Ex การขับทิ้งของ vit B และยาต่างๆ

- Gradient-time limitation
    - Ex. H+, K+

2. Passive transport การดูดซึมกลับของสารแบบไม่ใช้พลังงาน เกิดขึ้นตามลาดความเข้มข้นของไฟฟ้าและเคมี จากความเข้มข้นมากไปยังความเข้มข้นน้อย
    - NH3+

องค์ประกอบของปัสสาวะ

(Composition of Urine)

- ไตขับปัสสาวะทิ้งวันละ 500-1,500 ml (HUMAN)
- องค์ประกอบของปัสสาวะคือ
    - น้ำ
    - เกลือแร่ส่วนเกิน Na+, K+, NH4+, Ca++, Mg++, Cl-, phosphate
    - ของเสียจาก metabolism ของสารอาหาร เช่น urea, uric acid, creatinine
- pH = 5.0-7.0
- ความเข้มข้น 600-800 milliosmole/l
- สิ่งที่ไม่ควรพบในปัสสาวะ
    - Glucose, amino acid, RBC, ketone, WBC, leukocyte

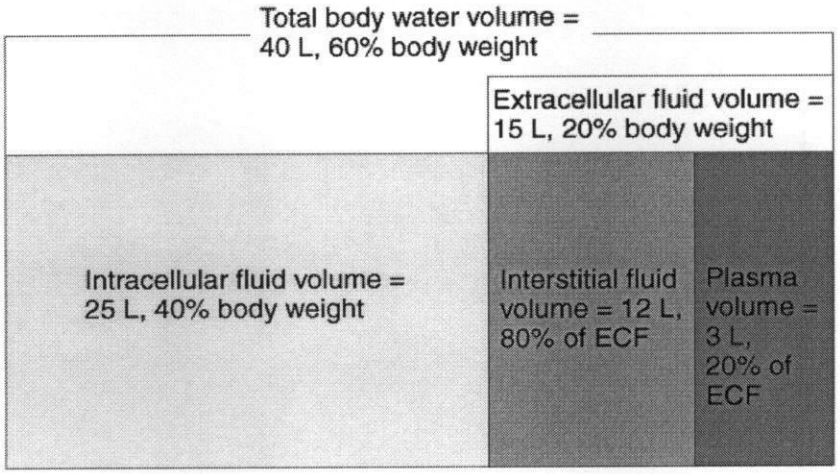
สมดุลของน้ำในร่างกาย

(Body Water Balance)

- น้ำในร่างกาย ขึ้นกับ จำนวนไขมัน อายุ เพศ

1. Intracellular Fluid
2. Extracellular Fluid
    - Interstitial fluid
    - Plasma volume
    - Transcellular fluid

Fluid Compartments



แผนภาพที่ 3 Fluid Compartments

การหาปริมาตรของน้ำในร่างกาย

- V = Q/C

  V = ปริมาตรของน้ำที่ต้องการหา (ml)

  Q = ปริมาตรของสารที่ฉีดเข้าไปเมื่อเริ่มต้น (mg)

  C = ความเข้มข้นของสาร เมื่อละลายได้ทั่วถึงในน้ำส่วนที่ต้องการวัด (mg/ml)

- Ex. ต้องการหาน้ำในร่างกายทั้งหมดของชายหนัก 90 kg จะฉีด D2O บริสุทธิ์ 100 ml เข้าๆปในหลอดเลือดดำ ทิ้งไว้ 2 hr. เพื่อให้สารกระจายตัว เจาะเลือดเพื่อวัดความเข้มข้นของสาร พบว่า D2O มีค่า 0.2 ml/100 ml ของ plasma และพบว่า D2O ถูกขับทิ้งออกจากร่างกาย 0.5 ml/100 ml

ปริมาตรของ D2O ที่กระจายอยู่ในร่างกายจริง

= 100-0.5 = 99.5 ml

TBW = 99.5 ml/0.002/ml/ml

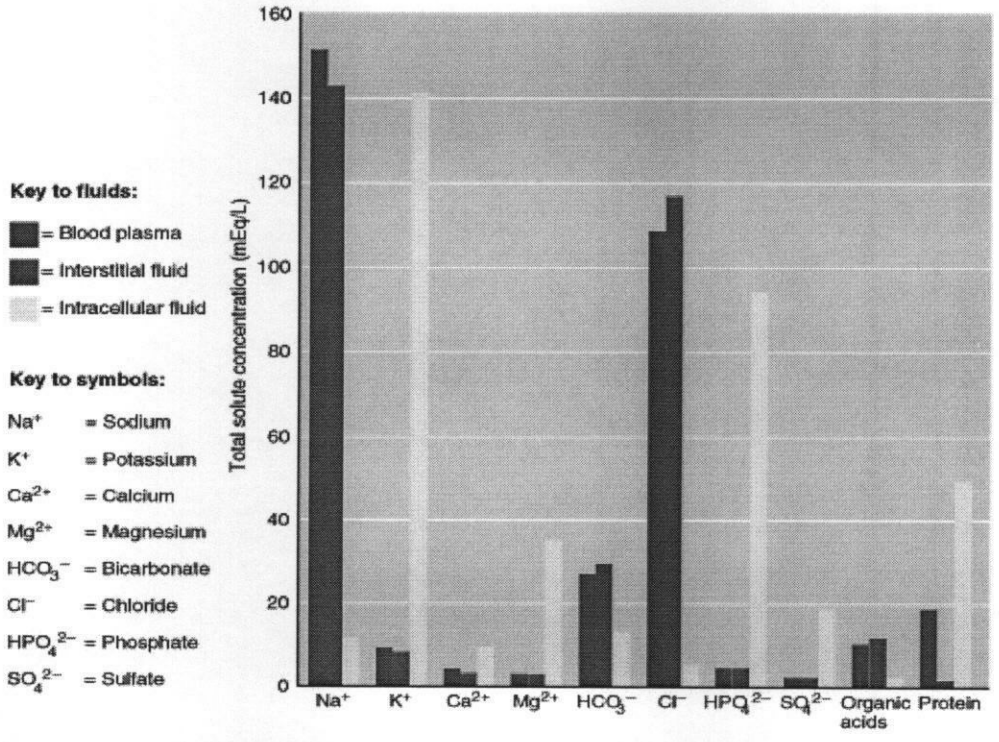
= 49,750 ml

= (49.8x100)/90 = 55.3% ของน้ำหนักตัวเป็นกิโลกรัม

องค์ประกอบของน้ำในร่างกาย

	ECF (mEq/L)	ICF (mEq/L)
Na^+	145	12
K^+	4	150
Ca^{++}	5	0.001
Cl^-	105	5
HCO_3^-	25	12
SO_4	2	100
pH	7.4	7.1

ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบของแร่ธาตุต่าง ๆ ของน้ำในร่างกาย



แผนภาพที่ 4 องค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ในของเหลวส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย

การเคลื่อนที่แลกเปลี่ยนของน้ำในร่างกาย

- ขึ้นกับ แรงดันของของเหลว (hydrostatic pressure) และแรงดันออสโมติก (osmotic pressure)
- การบวมน้ำมีสาเหตุจาก
    1. แรงดันของของเหลวสูงขึ้น
    2. โปรตีนในเลือดต่ำ
    3. มีการอุดตันของท่อระบบน้ำเหลือง
    4. Permeable ของหลอดเลือดฝอยเพิ่มขึ้น

การควบคุมความเข้มข้นของน้ำในร่างกาย

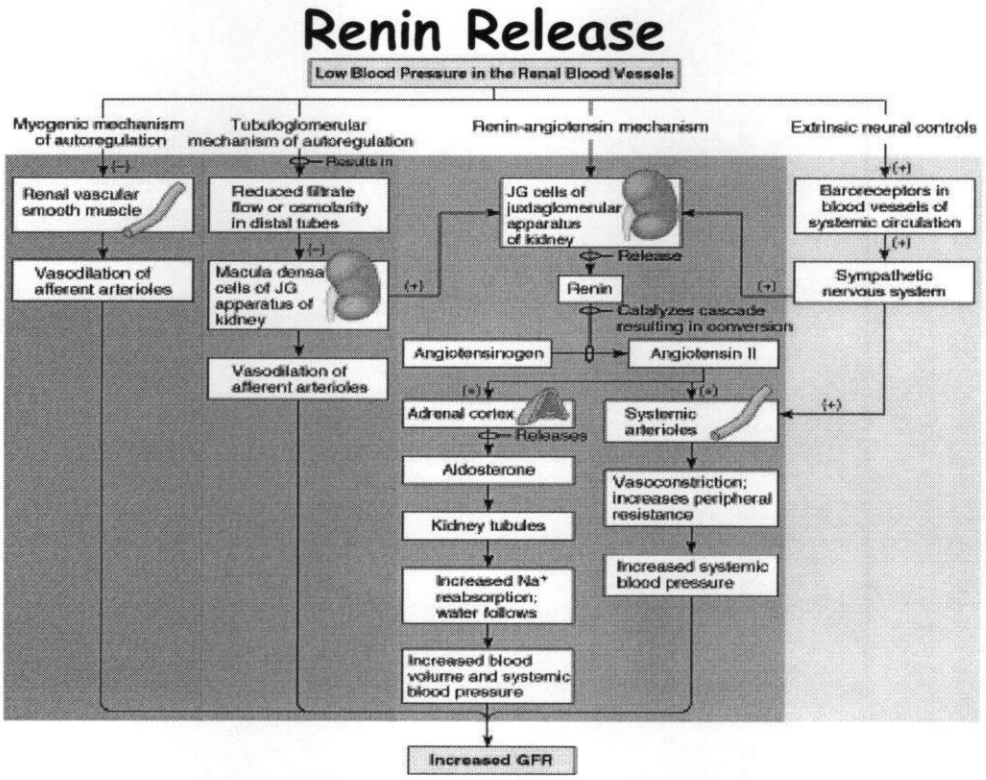
- Antidiuretc hormone, ADH หรือ vasopressin
- การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเลือดหรือความดัน
  การกระหายน้ำ

ชนิดของท่อไต	การขนถ่ายแบบ active		การขนถ่ายแบบ passive	
	การดูดกลับ	การขับออก	การดูดกลับ	การขับออก
ท่อไตส่วนต้น (Proximal tubule, PT)	Na^+, K^+ Ca^{+2}, Mg^{+2} PO_4^-, SO_4^- Glucose Protein Urate Amino acids Vitamins	PAH$^-$, H^+ Urate Penicillin Creatinine	Cl^-, HCO_3^- H_2O Urea	NH_3
ท่อไตรูปตัวยู (Loop of Henle)				
- ท่อขาลง			H_2O	Urea
- ท่อขาขึ้น				
- ส่วนบาง			Cl^-, Na^+	Urea
- ส่วนหนา	Cl^-, Na^+, K^+			
ท่อไตส่วนปลาย (Distal tubule, DT)	Na^+, Ca^{+2}, Mg^{+2} Urate	H^+, K^+	H_2O, Cl^-	K^+ NH_3
ท่อไตรวม (Collecting duct)	Na^+, K^+	H^+	H_2O, Urea	

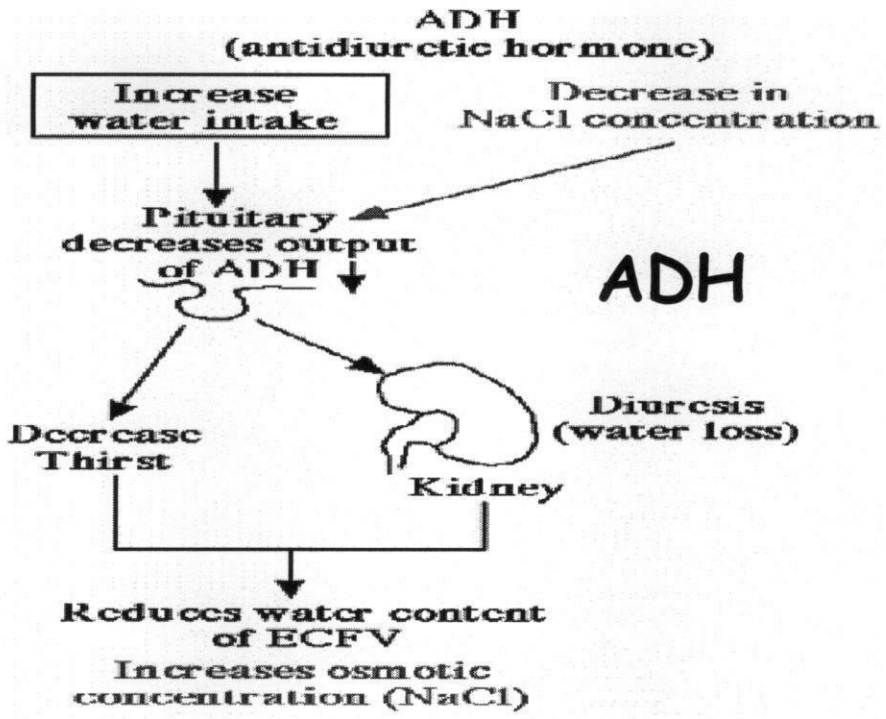
ตารางที่ 2 การขนถ่ายสารชนิดต่าง ๆ แบบ Active และ Passive transport ที่ท่อไตส่วนต่าง ๆ

การควบคุมปริมาตรของน้ำในร่างกาย

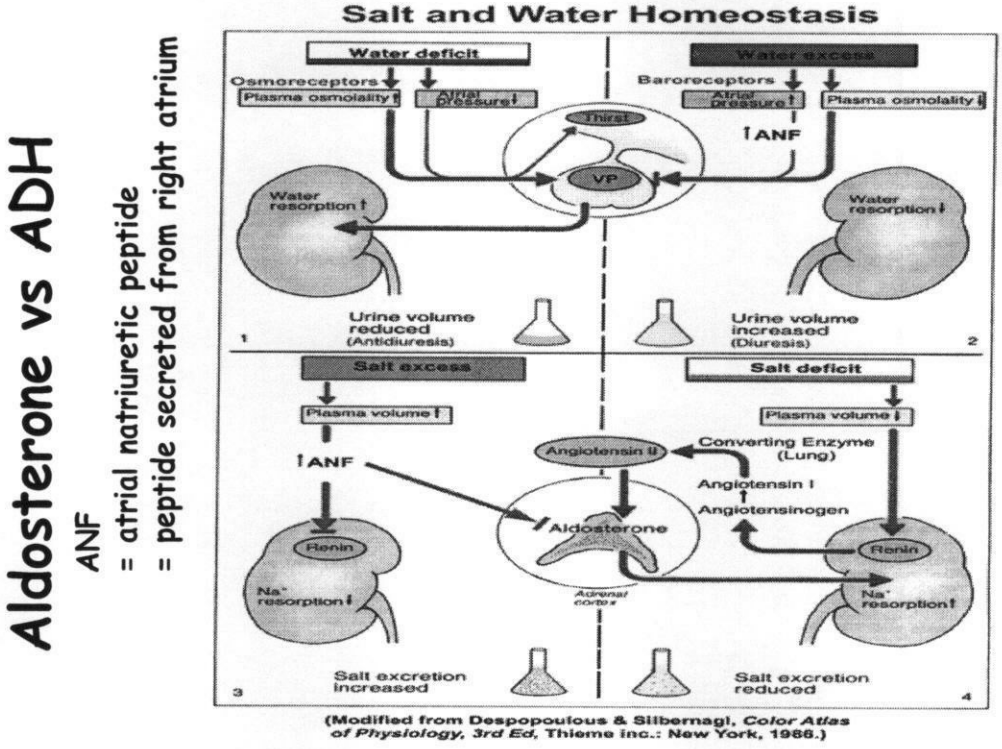
- สัญญาณทางประสาท
- Renin-angiotensin-aldosterone system
- ANP (Atrial Natriuretic peptide)
  - หลั่งจากหัวใจห้องบน



แผนภาพที่ 5 การหลั่งของ Renin

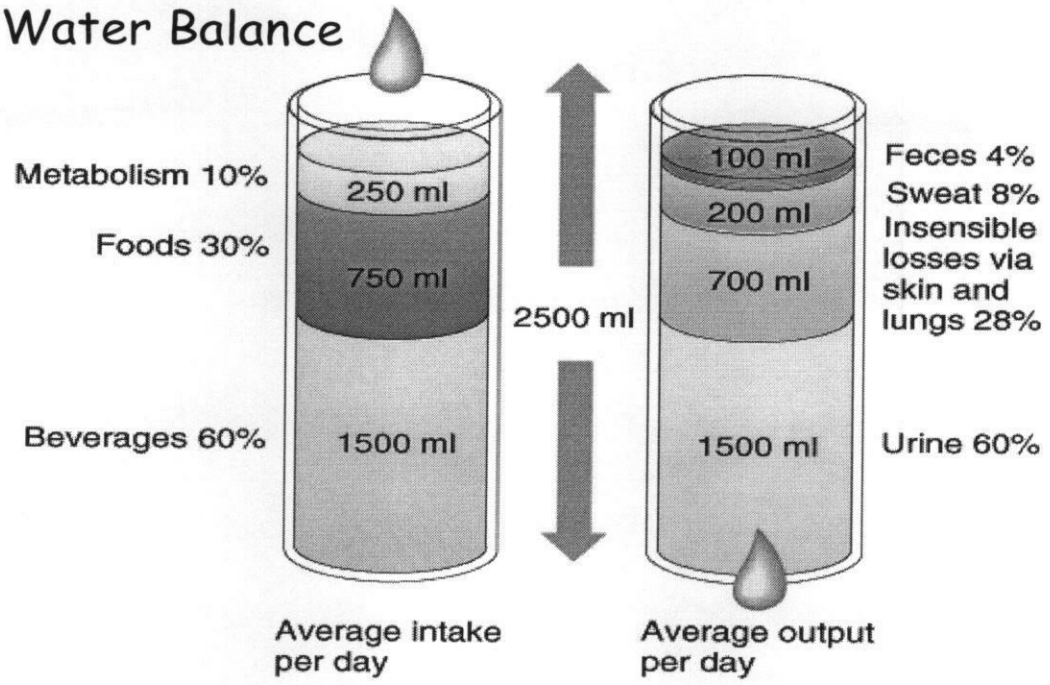


แผนภาพที่ 6 กลไกการทำงานของ Antidiuretic Hormone (ADH)

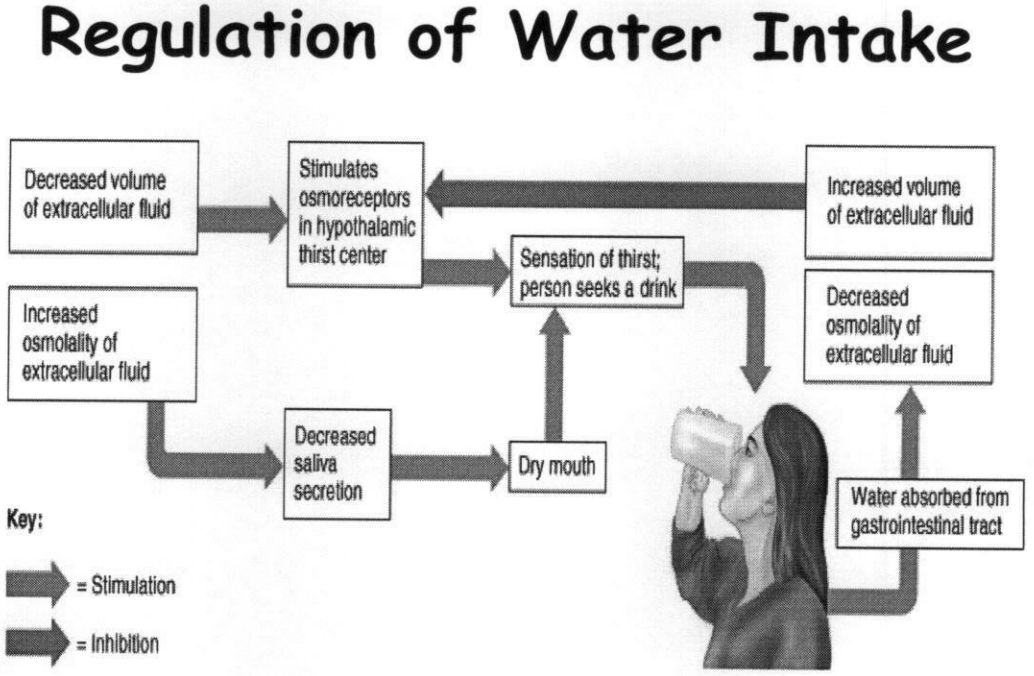


(Modified from Despopoulous & Silbernagl, *Color Atlas of Physiology, 3rd Ed*, Thieme inc.: New York, 1986.)

แผนภาพที่ 7 การควบคุมสมดุลของน้ำและเกลือในร่างกาย

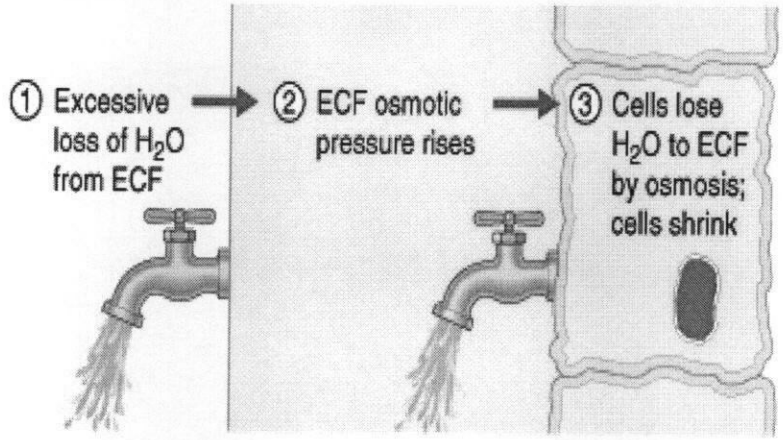


แผนภาพที่ 8 สมดุลของน้ำในร่างกาย



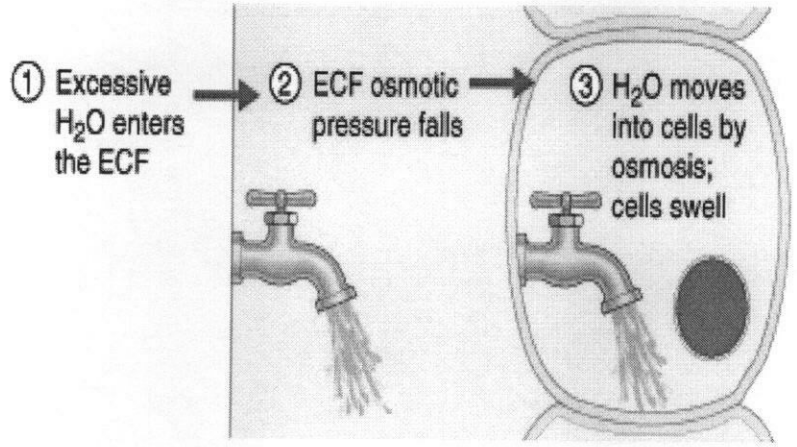
แผนภาพที่ 9 การควบคุมความกระหายน้ำ

Disorders of Water Balance: Dehydration



(a) Mechanism of dehydration

Disorders of Water Balance: Hypotonic Hydration



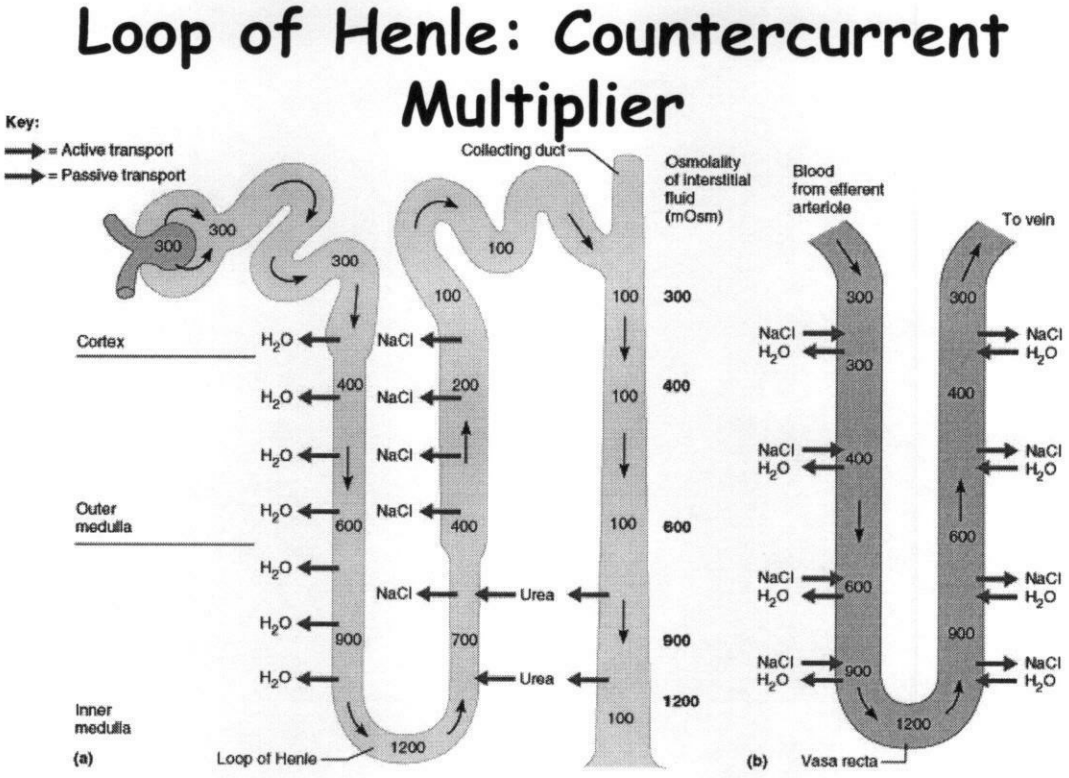
(b) Mechanism of hypotonic hydration (water intoxication)

รูปที่ 23 a) Dehydration

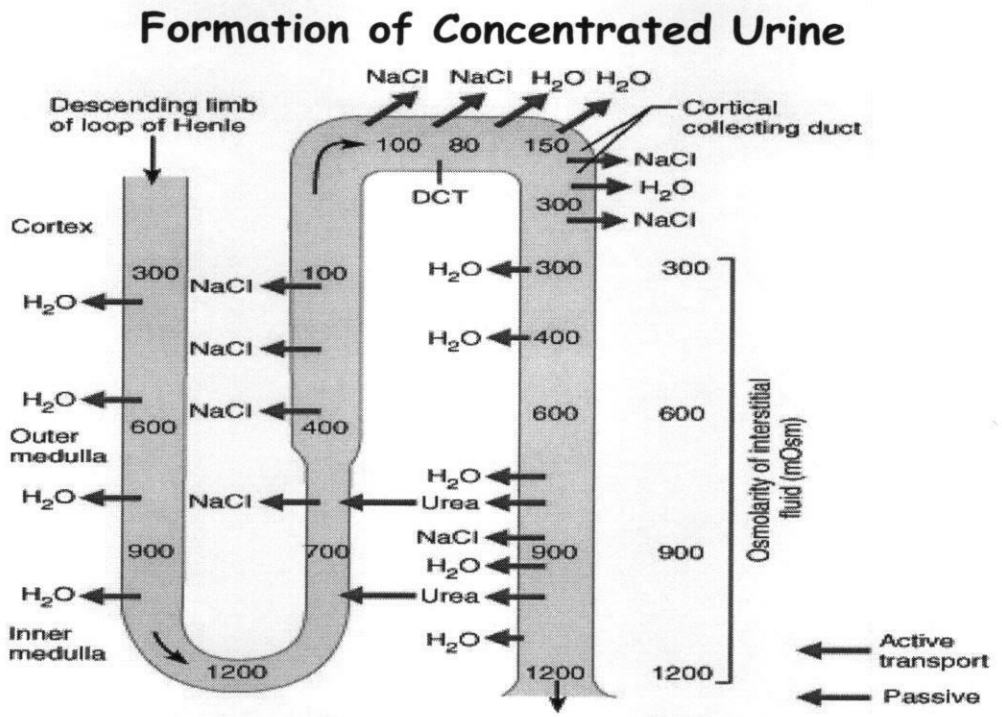
b) Hypotonic Hydration

การทำปัสสาวะให้เจือจาง-เข้มข้น

- มี 2 วิธี
  1. การมีลาดความเข้มข้นของสารในเนื้อไต
     - Countercurrent Multiplier
  2. ADH



รูปที่ 24 Loop of Henle: Countercurrent Multiplier



รูปที่ 25 การทำให้ปัสสาวะเข้มข้นมากขึ้น

การถ่ายปัสสาวะ

(Micturition)

- ปัสสาวะที่ถูกสร้างจากไต จะถูกขนส่งมาเก็บไว้ที่กระเพาะปัสสาวะ (urinary bladder) โดยอาศัยการบีบตัวแบบ peristalsis ของกล้ามเนื้อเรียบของ renal calyces กรวยไตและผนังของท่อนำปัสสาวะตามลำดับเพื่อรอการขับทิ้งที่ urethra
- ที่กระเพาะปัสสาวะ
  - มีผนังเป็นกล้ามเนื้อเรียบ detrusor muscle ที่สามารถยืดขยายได้
  - กระเพาะปัสสาวะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ตัวกระเพาะ (body) และคอที่มีหูรูด 2 ชั้น (internal & external)

Kidney,ureter,urinary bladder,urethra (Note. no UB in poultry)

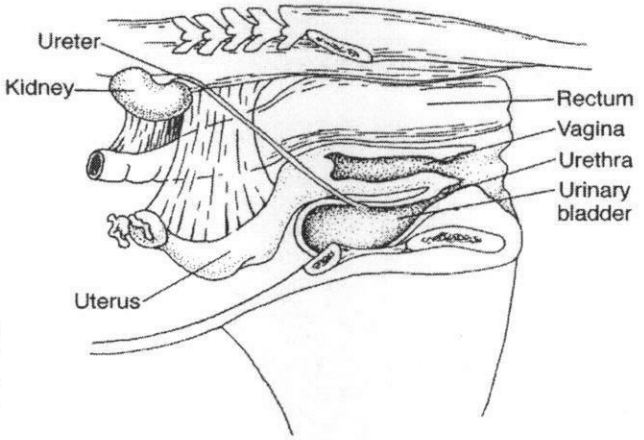
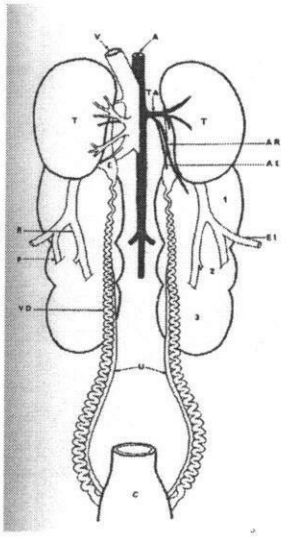


Figure 23-5. Kidneys, ureters, and urinary bladder in situ in the small ruminant. (Reprinted with permission from Reece W.O. *Physiology of Domestic Animals*. 2nd ed. Baltimore: Williams & Wilkins, 1997.)

รูปที่ 26 ตำแหน่งของกระเพาะปัสสาวะในสัตว์

Kidney,ureter,urinary bladder,urethra (Note. no UB in poultry)



รูปที่ 27 ไต, ท่อไต และทวารรวม (Cloaca) ในสัตว์ปีก

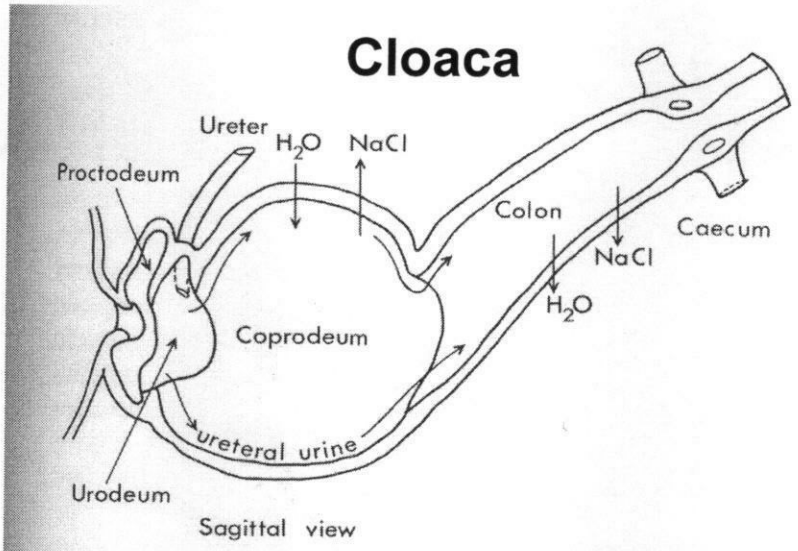
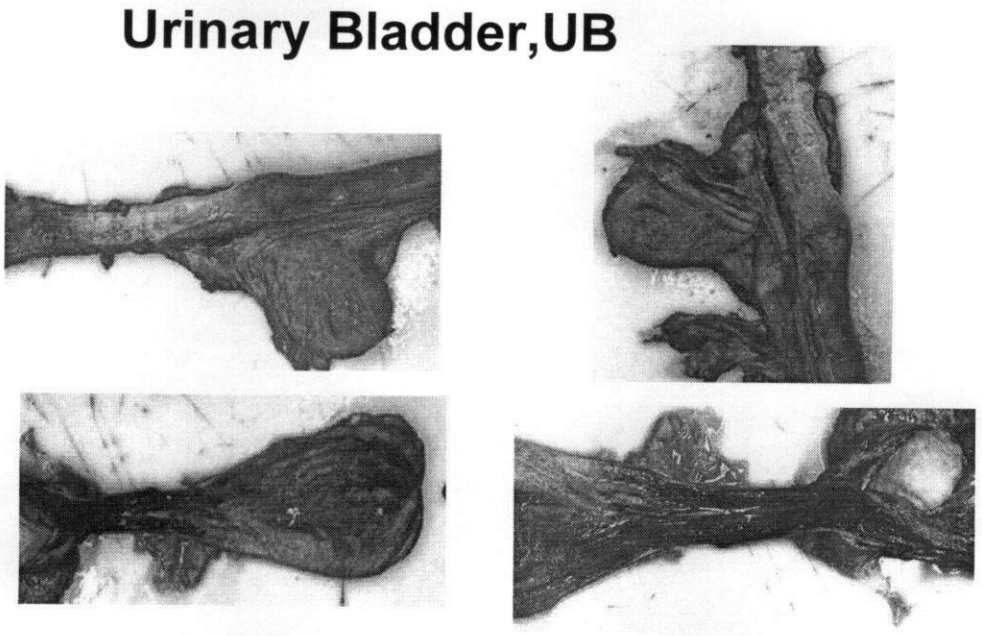
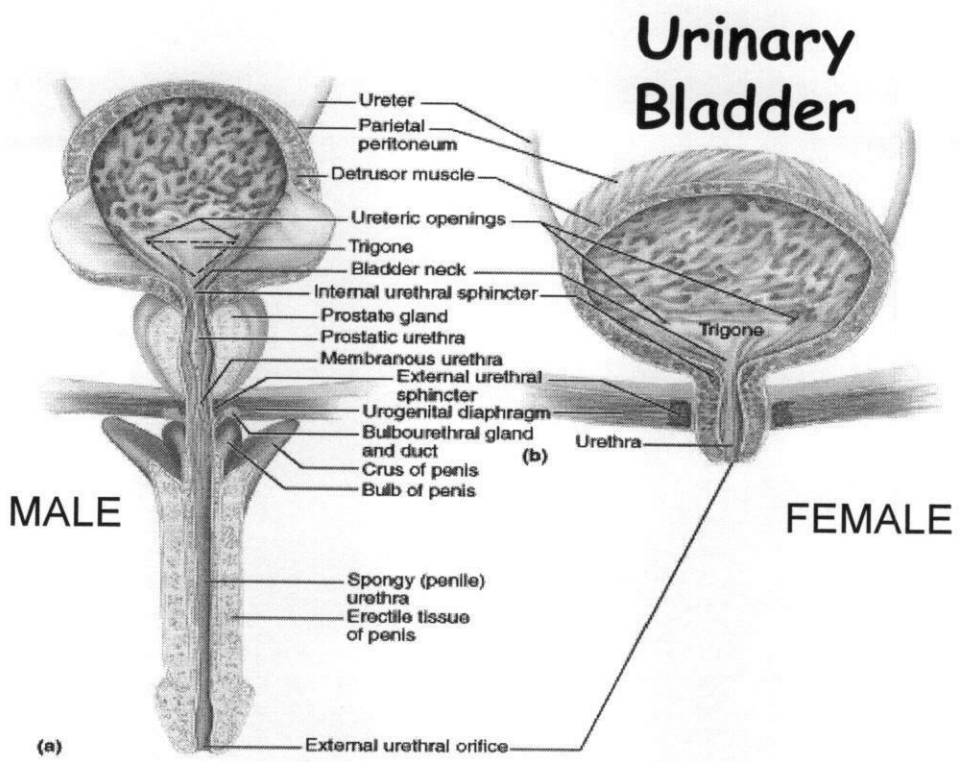


FIGURE 9 Lower intestine of the domestic fowl. Arrows indicate the retrograde flow of urine from urodeum to coprodeum, colon, and ceca, as well as possible directions for net fluxes of water and NaCl in coprodeum and colon. (Modified from Choshniak *et al.* (1977), with permission.)

รูปที่ 28 ลักษณะของทวารรวม (Cloaca) ในสัตว์ปีก



รูปที่ 29 กระเพาะปัสสาวะ (Urinary Bladder)

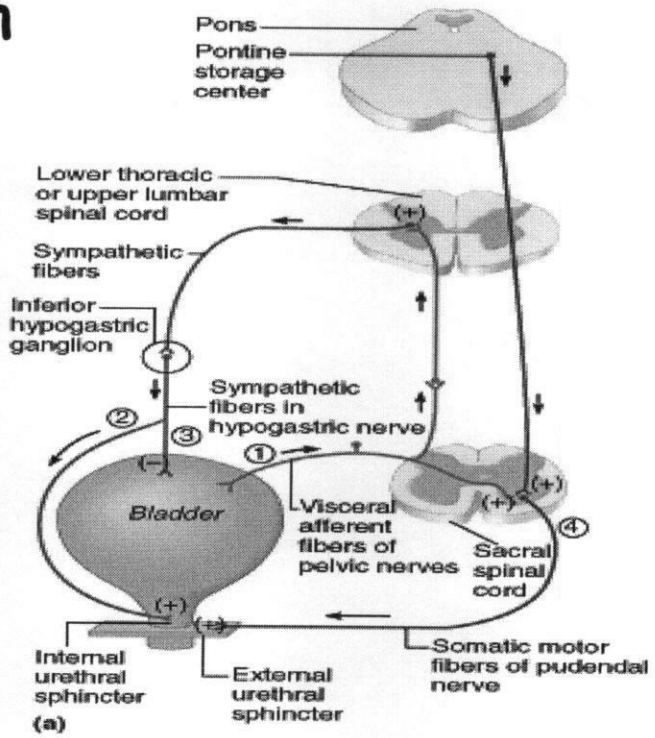


รูปที่ 30 กระเพาะปัสสาวะในมนุษย์

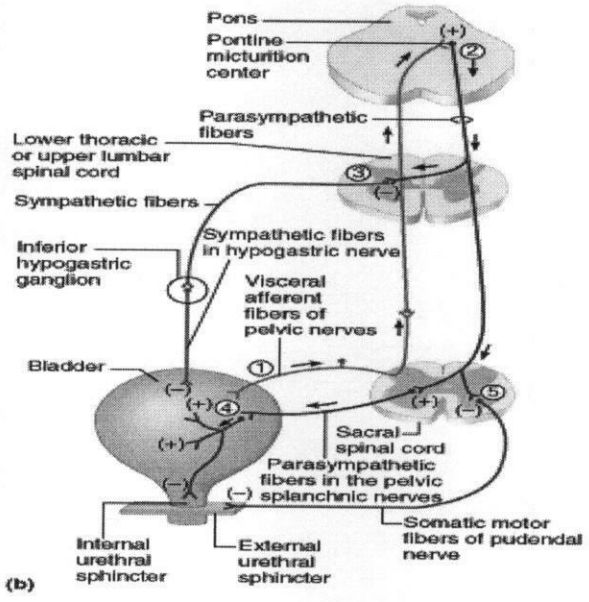
การควบคุมการถ่ายปัสสาวะ

- ระบบประสาท
  - Pelvic nerve ประกอบด้วยเส้นใยที่นำคำสั่งเข้าและออกจากไขสันหลัง เส้นใยที่นำคำสั่งเข้าทำหน้าที่รับรู้การยืดขยายของผนังกระเพาะปัสสาวะ
  - Parasympathetic จะทำให้กระเพาะปัสสาวะบีบตัวอย่างแรงเพื่อไล่ปัสสาวะออก
  - Sympathetic เลี้ยงบริเวณคอ การกระตุ้นจะทำให้ internal sphincter ปิด
  - Pudendal nerve การกระตุ้นจะทำให้ external sphincter ปิด

Micturition (Voiding)



Micturition (Urination)



รูปที่ 31 กลไกการควบคุมการถ่ายปัสสาวะ a) Voiding b) Urination

Note for avian urinary system

Note for avian urinary system

- Avian kidneys are paired retropiritoneal structures that fitted closely to the bony depressions on the dorsal wall of the fused pelvis
- Each kidneys has cranial, middle and caudal lobes
- Ureters transport urine from the kidneys to the cloaca (mammalian urinary bladder not present)
- Avian kidneys are characterized by having two nephron tppes, reptilian and mammalian
- The reptile types lack loop of Henle and are located in the cortex. They are not capable of concentrating urine
- Mammalian-type nephrons have well-defined loops of Henle
- glomerular filtration, tubular reabsorption and tubular secretion เหมือนใน mammals
- When both nephron types are function, 25% of the filtrate comes from mammalian-type nephrons and 75% comes from reptile-type nephrens
- ขับถ่ายของเสียในรูปของ uric acid (ammonia Uric acid ที่ liver และ kidney)
- Bird urine is cream colored (uric acid) and contains thick mucus
- After presentation of ureteral urine to the cloaca,there may be retrograde flow into the colon and ceca (Na is absorbed and water is absorbed by osmosis)
- Urine flow for hydrated chicken is reported to be about 18 ml/kg/hr

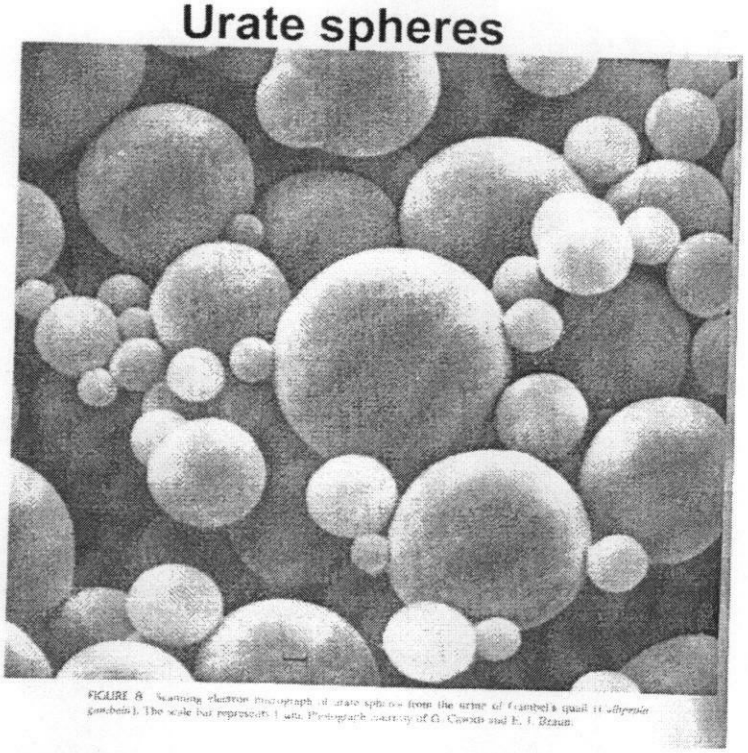


FIGURE 8 Scanning electron micrograph of urate spheres from the urine of Gambel's quail (*Callipepla gambelii*). The scale bar represents 1 μm. Photograph courtesy of G. Cowan and E. J. Braun.

รูปที่ 32 ผลึกของยูเรต (Urate Spheres) ในกระเพาะปัสสาวะของสัตว์ปีก

ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี