หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๖

ชีววิทยา
เล่ม ๕

ตามผลการเรียนรู้
กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)
ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑

ตัวอย่าง

๘๘.-

หนังสือเรียน

รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ชีววิทยา

ชั้น

มัธยมศึกษาปีที่ ๖ เล่ม ๕

ตามผลการเรียนรู้
กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)
ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑

จัดทำโดย
สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงศึกษาธิการ

จัดทำเป็นฉบับ e-book **ครั้งที่ ๒ พ.ศ. ๒๕๖๖**

มีลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติ

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ได้จัดทำหนังสือเรียนฉบับ e-book นี้ขึ้น โดยมีเนื้อหาเช่นเดียวกับหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ชีววิทยา ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๖ เล่ม ๕ ฉบับสื่อสิ่งพิมพ์ ที่จัดทำตามผลการเรียนรู้ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑ ทุกประการ เพื่อให้นักเรียน ครู ผู้ปกครอง นักวิชาการ และ ผู้สนใจทั่วไปเข้าถึงได้ง่ายและสะดวกรวดเร็ว รวมทั้งสามารถเลือกใช้ตามความเหมาะสมกับจุดประสงค์ต่าง ๆ ทั้งนี้ สสวท. ขอสงวนสิทธิ์ในหนังสือเรียนฉบับ e-book นี้ตามกฎหมายลิขสิทธิ์ ห้ามผู้ใดทำซ้ำ คัดลอก ดัดแปลง เลียนแบบ จำหน่าย หรือ เผยแพร่โดยมิได้รับอนุญาต

สามารถเข้าถึงสื่อดิจิทัลต่าง ๆ ของ สสวท. ได้ที่ http://www.ipst.ac.th/ebook-resource/

คำชี้แจง

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ได้จัดทำตัวชี้วัดและสาระการเรียนรู้แกนกลาง กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษา ขั้นพื้นฐานพุทธศักราช ๒๕๕๑ โดยมีจุดเน้นเพื่อพัฒนาผู้เรียนให้มีความรู้ความสามารถที่ทัดเทียมกับนานาชาติ ได้เรียนรู้วิทยาศาสตร์ที่เชื่อมโยงความรู้กับกระบวนการ ใช้กระบวนการสืบเสาะหาความรู้และแก้ปัญหาที่หลากหลาย มีการทำกิจกรรมด้วยการลงมือปฏิบัติเพื่อให้ผู้เรียนได้ใช้ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์และทักษะแห่งศตวรรษที่ ๒๑ ซึ่งในปีการศึกษา ๒๕๖๑ เป็นต้นไป โรงเรียนจะต้องใช้หลักสูตรกลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) สสวท. จึงได้จัดทำหนังสือเรียนที่เป็นไปตามมาตรฐานหลักสูตรเพื่อให้โรงเรียนได้ใช้สำหรับจัดการเรียนการสอนในชั้นเรียน

หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ชีววิทยา ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๖ เล่ม ๕ นี้ มีผลการเรียนรู้และสาระการเรียนรู้เพิ่มเติมที่ครอบคลุมเนื้อหาบางส่วนที่ปรากฏตามตัวชี้วัดของรายวิชาพื้นฐานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์ชีวภาพ โดยเมื่อผู้เรียนเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ชีววิทยา เล่ม ๑ – เล่ม ๖ ครบทุกชั้นปีในชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๔ – ๖ แล้วจะสามารถบรรลุผลสัมฤทธิ์ตามตัวชี้วัดของรายวิชาพื้นฐานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์ชีวภาพได้ และในขณะเดียวกันก็สามารถต่อยอดเนื้อหาจากรายวิชาพื้นฐานไปสู่เนื้อหาในรายวิชาเพิ่มเติมได้โดยไม่ต้องเสียเวลาเรียนซ้ำซ้อน ทั้งนี้หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ชีววิทยา เล่ม ๕ นี้ มีเนื้อหาที่จำเป็นต้องเรียนประกอบด้วยเรื่องระบบประสาทและอวัยวะรับความรู้สึก การเคลื่อนที่ของสิ่งมีชีวิต ระบบต่อมไร้ท่อ ระบบสืบพันธุ์และการเจริญเติบโต และพฤติกรรมของสัตว์ ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาในด้านวิทยาศาสตร์ หรือประกอบอาชีพในสาขาที่ใช้วิทยาศาสตร์เป็นฐาน เช่น แพทย์ ทันตแพทย์ สัตวแพทย์ วิศวกร เทคนิคการแพทย์ วิทยาศาสตร์การกีฬา เทคโนโลยีชีวภาพ ฯลฯ โดยเน้นกระบวนการคิดวิเคราะห์และการแก้ปัญหา เชื่อมโยงความรู้สู่การนำไปใช้ในชีวิตจริง ผู้เรียนจะได้ทำกิจกรรมที่เป็นพื้นฐานที่สำคัญ รวมทั้งกิจกรรมที่ผู้เรียนสามารถคิดค้นและออกแบบการทดลองด้วยตนเอง มีแบบตรวจสอบความรู้ความเข้าใจก่อนเรียน มีแบบฝึกหัดเพื่อให้ตรวจทานความรู้หลังจากที่เรียนไปแล้ว รวมทั้งสรุปความรู้ในแต่ละบทด้วย ในการจัดทำหนังสือเรียนเล่มนี้ ได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดียิ่งจากผู้ทรงคุณวุฒิ นักวิชาการอิสระ คณาจารย์ทั้งหลาย รวมทั้งครูผู้สอน นักวิชาการ จากสถาบันและสถานศึกษาทั้งภาครัฐและเอกชน จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

สสวท. หวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ชีววิทยา เล่ม ๕ นี้ จะเป็นประโยชน์แก่ผู้เรียนและผู้ที่เกี่ยวข้องทุกฝ่าย ที่จะช่วยให้การจัดการศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมีประสิทธิภาพและประสิทธิผล หากมีข้อเสนอแนะใดที่จะทำให้หนังสือเรียนเล่มนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โปรดแจ้ง สสวท. ทราบด้วย จะขอบคุณยิ่ง

(ศาสตราจารย์ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
ผู้อำนวยการสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
กระทรวงศึกษาธิการ

ข้อแนะนำทั่วไปในการใช้หนังสือเรียน

หนังสือเรียนเป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อให้นักเรียนได้ใช้ในการศึกษาเนื้อหาที่สำคัญ และเกิดทักษะที่จำเป็นที่สอดคล้องกับมาตรฐานและสาระการเรียนรู้ รวมทั้งยังมีสื่อที่ช่วยเสริมการเรียนรู้ของนักเรียน โดยสามารถเชื่อมต่อไปยังหน้าเว็บไซต์รายการสื่อได้จาก QR code หรือ URL ที่อยู่ประจำแต่ละบท การทำความเข้าใจเกี่ยวกับสัญลักษณ์หรือข้อความตามหัวข้อต่าง ๆ ที่ปรากฏในหนังสือเรียนจะช่วยให้นักเรียนใช้หนังสือเรียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสัญลักษณ์หรือข้อความตามหัวข้อต่าง ๆ ที่ปรากฏในหนังสือเรียน มีดังนี้

1 **คำถามสำคัญ**

คำถามประจำบทที่ผู้เรียนต้องอาศัยความรู้ทั้งหมดในบทเรียนในการตอบคำถาม ซึ่งผู้เรียนควรตอบได้หลังจากได้เรียนรู้ในบทนั้นแล้ว

2 **จุดประสงค์การเรียนรู้**

เป้าหมายของการจัดการเรียนรู้ที่ต้องการให้นักเรียนเกิดความรู้หรือทักษะหลังจากผ่านกิจกรรมการจัดการเรียนรู้ในแต่ละหัวข้อ ซึ่งผู้เรียนควรศึกษาทำความเข้าใจก่อนเริ่มเรียนรู้ในแต่ละหัวข้อ

3 **ตรวจสอบความรู้ก่อนเรียน**

ชุดคำถามที่ใช้ในการตรวจสอบความรู้ก่อนเรียน ซึ่งผู้เรียนควรตอบคำถามให้ถูกต้องทั้งหมด หากไม่ถูกต้องควรทบทวนเนื้อหานั้นก่อนเริ่มการเรียนรู้เรื่องใหม่ในแต่ละบท

4 **ชวนคิด**

คำถามระหว่างเรียนที่เชื่อมโยงหรือต่อยอดความรู้เดิมที่ศึกษาแล้วกับความรู้ใหม่หรือความรู้ในศาสตร์อื่น เพื่อให้ผู้เรียนเห็นความสัมพันธ์หรือความต่อเนื่องของเนื้อหา

5 **ตรวจสอบความเข้าใจ**

คำถามระหว่างเรียนที่ช่วยประเมินการเรียนรู้ซึ่งผู้เรียนสามารถใช้ตรวจสอบว่า ตนเองมีความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาแล้วหรือยัง

6 **ลองทำดู**

การปฏิบัติที่ช่วยเสริมความรู้ที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาในบทเรียน ซึ่งผู้เรียนสามารถลงมือปฏิบัติด้วยตนเองนอกเวลาเรียนได้

7

กิจกรรม

การปฏิบัติที่ช่วยในการเรียนรู้เนื้อหาหรือฝึกฝนให้เกิดทักษะตามจุดประสงค์การเรียนรู้ของบทเรียน โดยอาจเป็นการทดลอง การสืบค้นข้อมูล หรือกิจกรรมอื่น ๆ ซึ่งผู้เรียนควรลงมือปฏิบัติกิจกรรมด้วยตนเอง

8

ตัวอย่าง

การแสดงแนวทางการตอบคำถามหรือการแก้โจทย์ปัญหา ซึ่งผู้เรียนสามารถศึกษาเพื่อให้มีความเข้าใจในเนื้อหาบทเรียนมากขึ้น

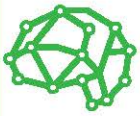
9

กิจกรรมเสนอแนะ

การปฏิบัติที่ช่วยเสริมความรู้ที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาในบทเรียน ซึ่งอาจเป็นกิจกรรมที่ลงมือปฏิบัติในห้องเรียนหรือนอกเวลาเรียนได้

10

ความรู้เพิ่มเติม



ความรู้ที่เพิ่มเติมจากเนื้อหาในบทเรียน เพื่อให้นักเรียนมีความรู้ความเข้าใจมากขึ้น โดยไม่มีการวัดและประเมินผล

11

รู้หรือไม่

ความรู้ที่เชื่อมโยงให้เห็นความสอดคล้องของเนื้อหาบทเรียนกับปรากฏการณ์หรือสถานการณ์ในชีวิตประจำวัน

12

การเชื่อมโยงความรู้

เนื้อหาที่แสดงความเชื่อมโยงของความรู้ในบทเรียนกับความรู้ในวิชาวิทยาศาสตร์สาขาอื่น ความรู้ในชีวิตประจำวัน หรือความรู้ที่ใช้ในอาชีพต่าง ๆ

13

กรณีศึกษา

ตัวอย่างข้อมูลจากการศึกษาหรืองานวิจัยที่สอดคล้องกับความรู้ในบทเรียน เพื่อให้นักเรียนศึกษาวิเคราะห์จากกรณีจริง

14

สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

การสรุปเนื้อหาสำคัญภายในบทเรียน เพื่อช่วยให้เห็นภาพรวมของเนื้อหาทั้งหมด

15

แบบฝึกหัดท้ายบท

คำถามท้ายบทเรียนสำหรับให้ผู้เรียนตรวจสอบความเข้าใจหลังจากเรียนจบบทเรียนแล้ว ซึ่งผู้เรียนสามารถใช้เป็นข้อมูลในการทบทวนเนื้อหาที่ยังไม่เข้าใจได้

16

สื่อ AR (Augmented Reality)

สื่อเสริมการเรียนรู้ที่ใช้เทคโนโลยี AR ผู้เรียนสามารถดาวน์โหลดเพื่อใช้งานผ่านแอปพลิเคชัน "AR วิทย์ ม.ปลาย"

สารบัญ บทที่ 18 - 22

บทที่	เนื้อหา	หน้า
18 ระบบประสาทและอวัยวะรับความรู้สึก	18 ระบบประสาทและอวัยวะรับความรู้สึก	1
	18.1 การรับรู้และการตอบสนองของสัตว์	4
	18.2 โครงสร้างและการทำงานของเซลล์ประสาท	8
	18.3 ศูนย์ควบคุมระบบประสาทของมนุษย์	23
	18.4 การทำงานของระบบประสาท	34
	18.5 อวัยวะรับความรู้สึก	41
	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	60
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 18	62
19 การเคลื่อนที่ของสิ่งมีชีวิต	19 การเคลื่อนที่ของสิ่งมีชีวิต	69
	19.1 การเคลื่อนที่ของสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว	72
	19.2 การเคลื่อนที่ของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง	75
	19.3 การเคลื่อนที่ของสัตว์มีกระดูกสันหลัง	82
	19.4 การเคลื่อนที่ของมนุษย์	85
	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	97
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 19	98

ตัวอย่าง

สารบัญ บทที่ 18 - 22

บทที่	เนื้อหา	หน้า
20 ระบบต่อมไร้ท่อ	20 ระบบต่อมไร้ท่อ	101
	20.1 การทำงานร่วมกันของระบบต่อมไร้ท่อและระบบประสาท	104
	20.2 ต่อมไร้ท่อ	106
	20.3 ฮอร์โมนและการทำงานของฮอร์โมน	108
	20.4 การรักษาสมดุลของฮอร์โมน	132
	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	136
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 20	137
21 ระบบสืบพันธุ์และการเจริญเติบโต	21 ระบบสืบพันธุ์และการเจริญเติบโต	143
	21.1 การสืบพันธุ์ของสัตว์	146
	21.2 การสืบพันธุ์ของมนุษย์	152
	21.3 การเจริญเติบโตของสัตว์	165
	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	179
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 21	181

ตัวอย่าง

สารบัญ บทที่ 18 - 22

บทที่	เนื้อหา	หน้า
22 พฤติกรรมของสัตว์	22 พฤติกรรมของสัตว์	191
	22.1 การศึกษาพฤติกรรมของสัตว์	194
	22.2 กลไกการเกิดพฤติกรรม	195
	22.3 ประเภทพฤติกรรมของสัตว์	198
	22.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมและวิวัฒนาการของระบบประสาท	213
	22.5 การสื่อสารระหว่างสัตว์	215
	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	223
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 22	224
ภาคผนวก	ภาคผนวก	231
	คำศัพท์	232
	บรรณานุกรม	247
	ที่มาของรูป	251
	คณะกรรมการจัดทำหนังสือเรียน	253

ตัวอย่าง

บทที่ 18 | ระบบประสาทและอวัยวะรับความรู้สึก

ipst.me/10774

การเล่นดนตรี เช่น การเล่นเปียโน ต้องใช้ประสาทสัมผัสและการทำงานประสานกันของระบบต่าง ๆ ของร่างกาย โดยมีระบบประสาทควบคุม ออกคำสั่งไปยังกล้ามเนื้อโครงร่างบริเวณแขนและนิ้วมือให้กดคีย์บอร์ดเปียโน แต่การที่เล่นเปียโนได้นั้น ผู้เล่นต้องอ่านโน้ตเพลงซึ่งเป็นสิ่งเร้าที่ให้ข้อมูลเข้าสู่สมองที่มีหน้าที่ประมวลผลว่าเป็นตัวโน้ตใดที่ผู้เล่นได้มีประสบการณ์หรือมีการเรียนรู้มาก่อนเพื่อตัดสินใจที่จะกดคีย์บอร์ดเปียโนตามตัวโน้ตนั้น แล้วสมองจะสั่งการไปที่กล้ามเนื้อโครงร่างที่นิ้วมือเพื่อกดคีย์บอร์ดให้ถูกต้อง **กลไกการรับรู้และตอบสนองดังกล่าวเกิดขึ้นได้อย่างไร และมีโครงสร้างหรืออวัยวะใดเกี่ยวข้องบ้าง**

คำถามสำคัญ

1. **สัตว์รับรู้และตอบสนองต่อสิ่งเร้าได้อย่างไร**
2. **ระบบประสาทของมนุษย์มีโครงสร้างและการทำงานอย่างไร**
3. **อวัยวะรับความรู้สึกของมนุษย์มีโครงสร้างและการทำงานอย่างไร**

จุดประสงค์การเรียนรู้

1. สืบค้นข้อมูล อธิบาย และเปรียบเทียบโครงสร้างและหน้าที่ของระบบประสาทของไฮดรา พลานาเรีย ไส้เดือนดิน กุ้ง หอย แมลง และสัตว์มีกระดูกสันหลัง
2. อธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างและหน้าที่ของเซลล์ประสาท
3. ระบุชนิดของเซลล์ประสาทที่จำแนกตามจำนวนเส้นใยประสาทและหน้าที่
4. อธิบายเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าที่เยื่อหุ้มเซลล์ของเซลล์ประสาท
5. อธิบายเกี่ยวกับกลไกการเกิดกระแสประสาทและการถ่ายทอดกระแสประสาท
6. อธิบาย และสรุปเกี่ยวกับโครงสร้างของระบบประสาทส่วนกลางและระบบประสาทรอบนอก
7. สืบค้นข้อมูล อธิบายโครงสร้างและหน้าที่ของส่วนต่าง ๆ ของสมอง และไขสันหลัง
8. สืบค้นข้อมูล อธิบายการทำงานของระบบประสาทโซมาติกและระบบประสาทอัตโนวัติ
9. เปรียบเทียบและยกตัวอย่างการทำงานของระบบประสาทโซมาติกและระบบประสาทอัตโนวัติ
10. สืบค้นข้อมูลและอธิบายโครงสร้างและหน้าที่ของตา
11. สังเกตและอธิบายการหาตำแหน่งของจุดบอดและโฟเวีย
12. สืบค้นข้อมูลและอธิบายโครงสร้างและหน้าที่ของหู
13. สืบค้นข้อมูลและอธิบายโครงสร้างและหน้าที่ของจมูก
14. สืบค้นข้อมูลและอธิบายโครงสร้างและหน้าที่ของลิ้น
15. สืบค้นข้อมูลและอธิบายโครงสร้างและหน้าที่ของผิวหนัง
16. สังเกตและอธิบายความไวในการรับสัมผัสของผิวหนังในแต่ละบริเวณ
17. สืบค้นข้อมูลและยกตัวอย่างโรคที่เกี่ยวข้องกับตา หู จมูก ลิ้น และผิวหนัง และนำความรู้มาใช้ในการดูแลรักษาและป้องกันอันตรายอวัยวะรับความรู้สึกต่าง ๆ

สสวท

ตรวจสอบความรู้ก่อนเรียน

ให้นักเรียนใส่เครื่องหมายถูก (√) หรือผิด (×) หน้าข้อความตามความเข้าใจของนักเรียน

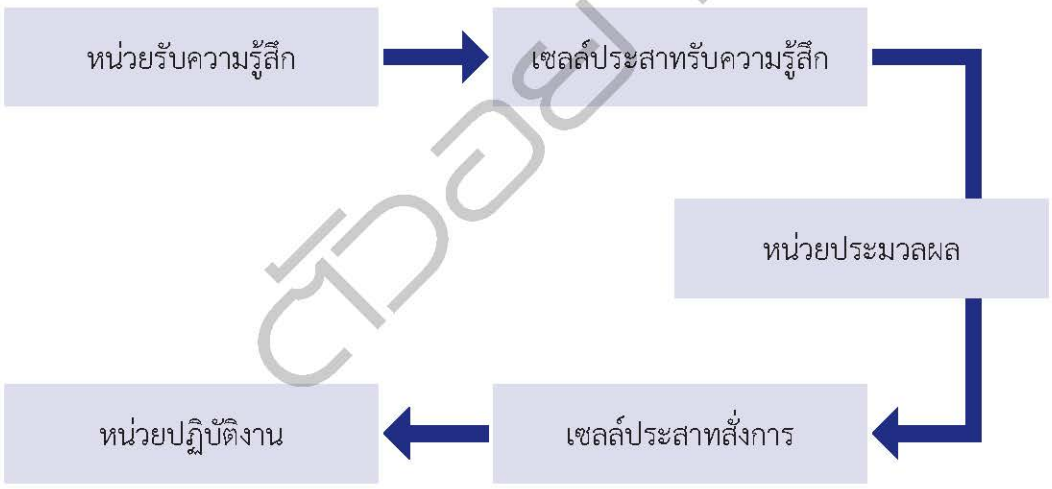
1. เซลล์ประสาทประกอบด้วยตัวเซลล์และเส้นใยประสาท
2. ศูนย์กลางของระบบประสาทของสัตว์มีกระดูกสันหลังประกอบด้วยสมองและไขสันหลัง
3. เดนไดรต์เป็นเส้นใยประสาทที่ทำหน้าที่รับกระแสประสาท ขณะที่แอกซอนทำหน้าที่ส่งกระแสประสาท
4. การถ่ายทอดกระแสประสาทระหว่างเซลล์ประสาทกับเซลล์ประสาทหรือเซลล์อื่น ๆ ส่วนใหญ่ต้องใช้สารสื่อประสาท
5. ไซแนปส์เป็นบริเวณที่อยู่ชิดกันระหว่างปลายแอกซอนของเซลล์ประสาทเซลล์หนึ่งกับตัวเซลล์หรือส่วนของเดนไดรต์ของเซลล์ประสาทอีกเซลล์หนึ่ง
6. การเกิดรีเฟล็กซ์ของการกระตุกขาเมื่อเคาะที่เอ็นใต้หัวเข่าถูกควบคุมด้วยไขสันหลังและสมอง
7. ทาลามัสควบคุมสมดุลของน้ำในร่างกาย
8. ลิ้นแต่ละส่วนสามารถรับรสได้เพียงรสเดียวเท่านั้น
9. ผู้ที่มีสายตาสั้นแก้ไขให้มองเห็นภาพชัดเป็นปกติได้โดยการใส่แว่นที่มีเลนส์นูน ส่วนผู้ที่มีสายตายาวแก้ไขได้โดยการใส่แว่นที่มีเลนส์เว้า
10. ขี้ไคล คือผิวหนังที่หลุดลอกจากผิวหนังชั้นหนังกำพร้า

ตัวอย่าง

ขณะที่อ่านโน้ตเพลงเพื่อเล่นเปียโน สมองได้รับข้อมูลจากการมองเห็นตัวโน้ตเพลงด้วยตาซึ่งจัดเป็นอวัยวะรับความรู้สึกที่เป็นหน่วยรับความรู้สึกอย่างหนึ่ง จากนั้นสมองจะเกิดการประมวลผลข้อมูลจากสิ่งที่ตาเห็น ซึ่งการประมวลผลของสมองจะมีการส่งสัญญาณให้ผู้เล่นเปียโนตอบสนองโดยการใช้นิ้วมือกดคีย์บอร์ดเปียโนจนเกิดเป็นเสียงเพลงขึ้น **การตอบสนองดังกล่าวเกิดขึ้นได้อย่างไร**

18.1 การรับรู้และการตอบสนองของสัตว์

ในการตอบสนองของสิ่งมีชีวิตจะเป็นการตอบสนองต่อ**สิ่งเร้า** (stimulus) ทั้งสิ่งเร้าภายในร่างกายและสิ่งเร้าภายนอกร่างกาย สิ่งเร้าดังกล่าวทำให้สิ่งมีชีวิตมีการรับรู้และตอบสนองในรูปแบบที่แตกต่างกัน การรับรู้เพื่อตอบสนองของสิ่งมีชีวิตโดยทั่วไปจะประกอบด้วยองค์ประกอบดังรูป 18.1

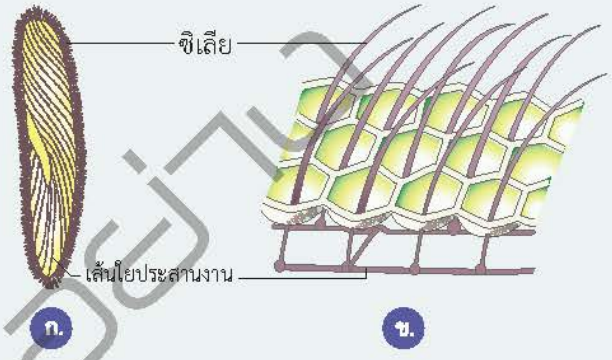


รูป 18.1 องค์ประกอบในการรับรู้เพื่อตอบสนองของสิ่งมีชีวิต

ในบางกรณีการตอบสนองของสัตว์จะเป็นการทำงานร่วมกันระหว่าง**ระบบประสาท** (nervous system) และ**ระบบต่อมไร้ท่อ** (endocrine system) โดยระบบประสาทจะควบคุมการตอบสนองที่เกิดขึ้นและสิ้นสุดเร็ว เช่น การวิ่งหนีสัตว์ดุร้าย ระบบประสาทจะสั่งให้กล้ามเนื้อหดตัว ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็ว ส่วนระบบต่อมไร้ท่อจะควบคุมการตอบสนองที่เกิดขึ้นช้ากว่า แต่เมื่อเกิดขึ้นแล้วจะมีผลต่อเนื่องเป็นเวลานาน เช่น การเต้นของหัวใจที่ยังถี่ เร็ว และแรง ถึงแม้จะหนีพ้นจากสัตว์ดุร้ายแล้วก็ตาม

ความรู้เพิ่มเติม

สิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวบางชนิด เช่น พารามีเซียม ไม่มีเซลล์ประสาทแต่ยังสามารถตอบสนองต่อสิ่งเร้าได้ เช่น มีการเคลื่อนที่เข้าหาหรือหนีแสงสว่าง อุณหภูมิ หรือสารเคมี จากการศึกษาพบว่าพารามีเซียมมีเส้นใยเชื่อมโยงระหว่างโคนของซิเลีย เรียกว่า เส้นใยประสานงาน (coordinating fiber) ดังรูป ซึ่งควบคุมการพัดโบกของซิเลียเพื่อให้เคลื่อนที่ไปยังทิศทางที่ต้องการได้

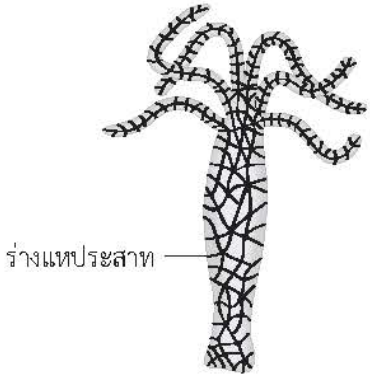


โครงสร้างที่เกี่ยวกับการตอบสนองของพารามีเซียม
ก. ซิเลียรอบ ๆ พารามีเซียม
ข. เส้นใยประสานงาน

18.1.1 การตอบสนองของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง

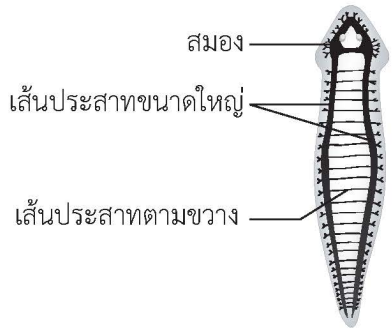
สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังมีการพัฒนาของระบบประสาทซับซ้อนแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวิวัฒนาการของสัตว์กลุ่มนั้น ทำให้มีการรับรู้และการตอบสนองที่แตกต่างกัน เช่น

- ฟองน้ำ เซลล์แต่ละเซลล์สามารถรับรู้และตอบสนองได้ แต่ไม่มีเซลล์ที่ทำหน้าที่ประสานงานระหว่างเซลล์ต่าง ๆ โดยเฉพาะ
- ไฮดรา มี**ร่างแหประสาท** (nerve net) ประกอบด้วยเซลล์ประสาทเชื่อมโยงกัน ดังรูป 18.2 เมื่อมีสิ่งเร้ามากระตุ้นจะเกิด**กระแสประสาท** (nerve impulse) เคลื่อนไปตามเซลล์ประสาทที่สานกันเป็นร่างแหจากจุดที่ถูกกระตุ้นและกระจายไปทั่วทั้งตัว ทำให้ไฮดราสามารถรับรู้และตอบสนองต่อสิ่งเร้าได้



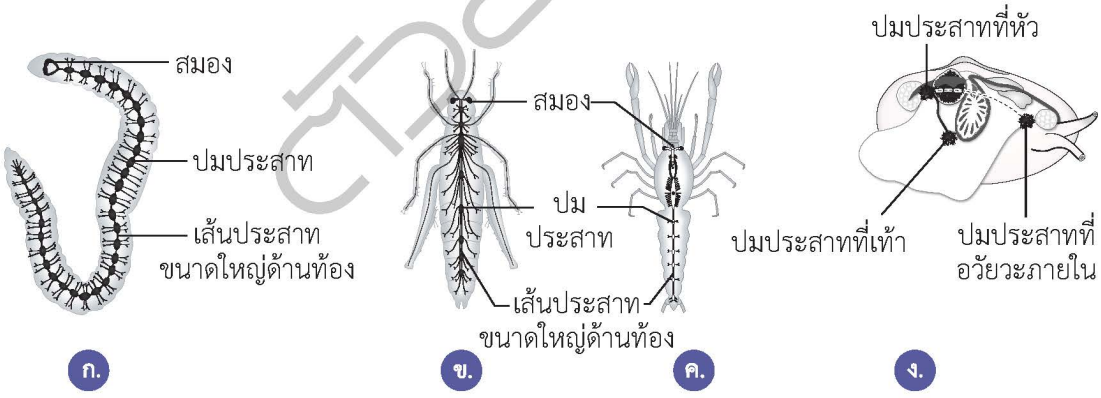
รูป 18.2 ร่างแหประสาทของไฮดรา

- พลานาเรีย มีเซลล์ประสาทรวมกันเป็นกลุ่มโดยเฉพาะบริเวณส่วนหัวเรียกว่า **ปมประสาท** (nerve ganglion) หรืออาจเรียกว่าสมอง ด้านล่างของปมประสาทยังมีเส้นประสาทที่แยกออกทั้งสองข้างของลำตัวเรียกว่า **เส้นประสาทขนาดใหญ่** (nerve cord) ยาวขนานไปตามลำตัวจากหัวจรดท้าย และระหว่างเส้นประสาทนี้มีเส้นประสาทเชื่อมเป็นระยะ ๆ เรียกว่า **เส้นประสาทตามขวาง** (transverse nerve) ทำให้มีลักษณะเป็น**แบบขั้นบันได** (ladder type) ดังรูป 18.3



รูป 18.3 ระบบประสาทของพลานาเรีย

- ไส้เดือนดิน แมลง และกุ้ง มีปมประสาทที่ใหญ่ขึ้นทำหน้าที่เป็นสมองอยู่ด้านหัว มี **เส้นประสาทขนาดใหญ่ด้านท้อง** (ventral nerve cord) ที่มีปมประสาทอยู่เป็นระยะ ๆ ตามความยาวลำตัว ดังรูป 18.4 ก. ข. และ ค. ส่วนสัตว์ในกลุ่มหอยและหมึกมีปมประสาทอยู่ที่หัว อวัยวะภายใน และบริเวณที่เป็น**เท้า** (foot) ดังรูป 18.4 ง.



รูป 18.4 ระบบประสาทของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังบางชนิด
ก. ไส้เดือนดิน ข. แมลง ค. กุ้ง ง. หอย

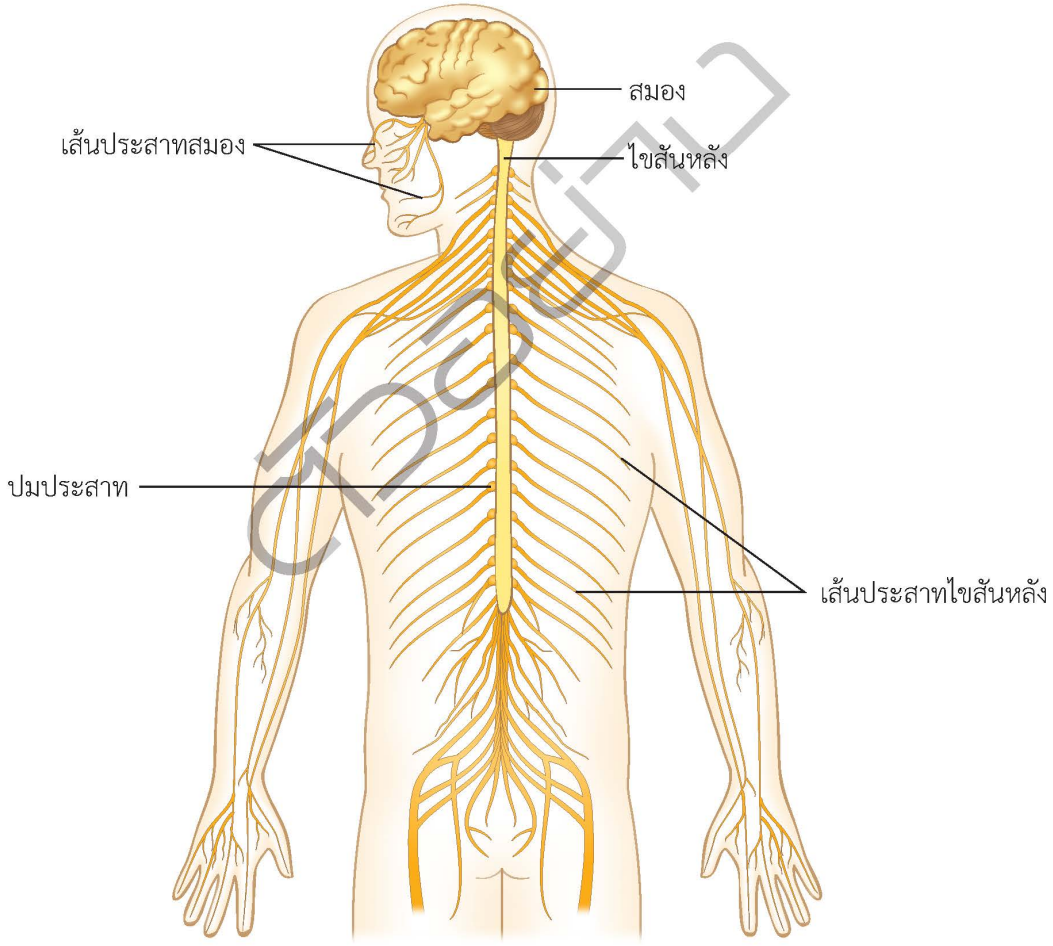
? ไฮดราพลานาเรียไส้เดือนดินแมลงกุ้งและหอยมีโครงสร้างของระบบประสาทแตกต่างกันอย่างไร

? การที่พลานาเรีย ไส้เดือนดิน แมลง กุ้ง และหอย มีปมประสาทอยู่บริเวณหัวมีผลต่อการรับรู้และการตอบสนองอย่างไร

? สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังชนิดอื่นมีระบบประสาทที่มีโครงสร้างแบบอื่นอีกหรือไม่ อย่างไร

18.1.2 การตอบสนองของสัตว์มีกระดูกสันหลัง

มนุษย์และสัตว์มีกระดูกสันหลังมีระบบประสาทที่พัฒนามาก เซลล์ประสาทส่วนใหญ่รวมกันอยู่ที่ส่วนหัวเรียกว่า **สมอง** (brain) ซึ่งมีขนาดใหญ่และเจริญมาก และมีส่วนที่ทอดยาวตามลำตัวทางด้านหลังเรียกว่า **ไขสันหลัง** (spinal cord) สมองและไขสันหลังทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของระบบประสาท รักษาดุลยภาพของร่างกาย โดยมี**ปมประสาท** (nerve ganglion) และ**เส้นประสาท** (nerve) แยกออกมาจากสมองและไขสันหลัง ดังรูป 18.5



รูป 18.5 สมอง ไขสันหลัง เส้นประสาท และปมประสาท

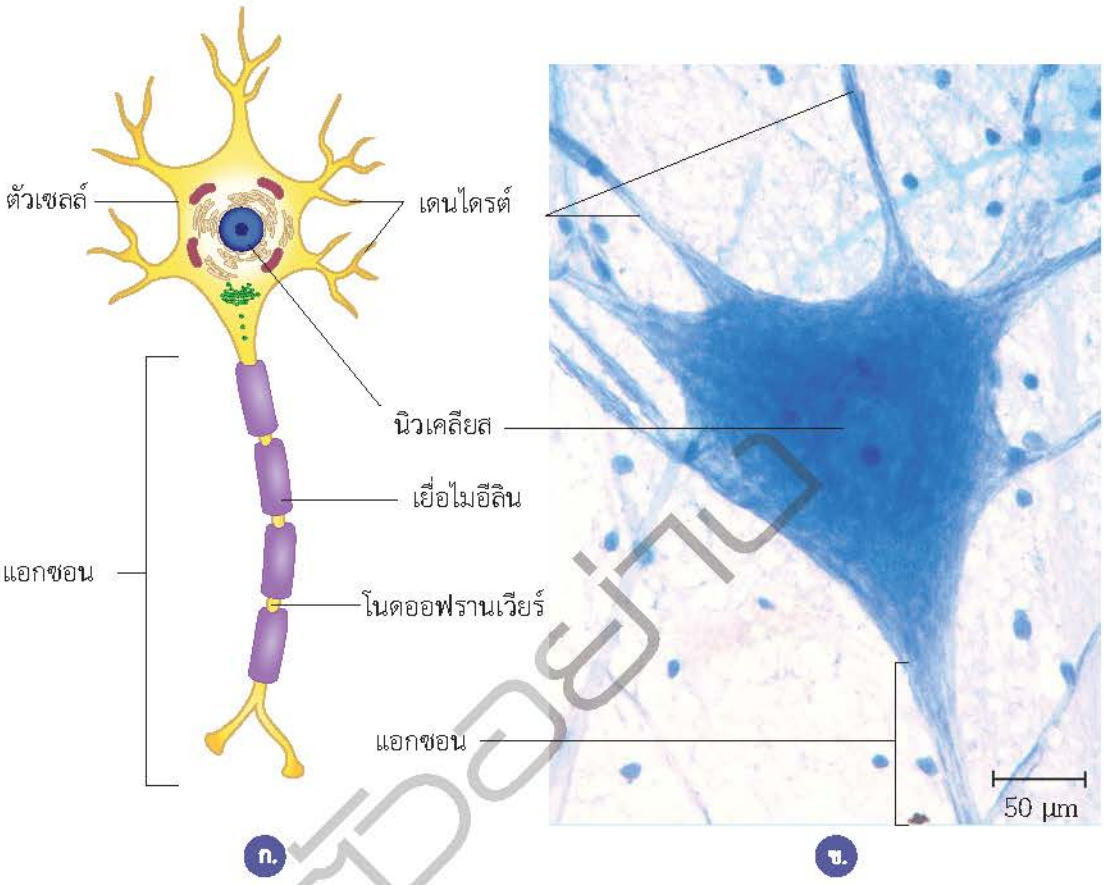
18.2 โครงสร้างและการทำงานของเซลล์ประสาท

มนุษย์สามารถรับรู้และตอบสนองต่อสิ่งเร้าในรูปแบบต่าง ๆ ได้ เป็นผลจากการทำงานร่วมกันของระบบประสาทซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ระบบ คือ **ระบบประสาทส่วนกลาง** (central nervous system; CNS) ที่ประกอบไปด้วย สมองและไขสันหลัง และ**ระบบประสาทรอบนอก** (peripheral nervous system; PNS) ที่ประกอบด้วย**เส้นประสาทสมอง** (cranial nerve) **เส้นประสาทไขสันหลัง** (spinal nerve) และปมประสาท **โครงสร้างของระบบประสาทมีอะไรบ้างและสามารถทำงานได้อย่างไร**

18.2.1 เนื้อเยื่อประสาท

ระบบประสาทของมนุษย์ประกอบด้วยเนื้อเยื่อประสาทที่กระจายอยู่ทั่วไปในร่างกายเป็นเครือข่ายที่เชื่อมถึงกัน โดยประกอบด้วยหน่วยทำงานที่เล็กที่สุดคือ **เซลล์ประสาท** (nerve cell) หรือ **นิวรอน** (neuron) จำนวนมาก ทำหน้าที่เกี่ยวกับการรับรู้ และส่งข้อมูลในลักษณะสัญญาณประสาทในรูปของ**สัญญาณเคมีไฟฟ้า** (electrochemical signal) หรือกระแสประสาท เซลล์ประสาทแต่ละเซลล์อาจมีการเชื่อมโยงกับเซลล์ประสาทอื่น ๆ จำนวนมาก และมี**เซลล์เกลีย** (glia cell) ทำหน้าที่สนับสนุนและค้ำจุนเซลล์ประสาท รายละเอียดของเนื้อเยื่อประสาทมีดังนี้

- **เซลล์ประสาท** ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ **ตัวเซลล์** (cell body) และ**เส้นใยประสาท** (nerve fiber) ดังรูป 18.6 ภายในตัวเซลล์ประกอบด้วย นิวเคลียส ไซโทพลาซึม และออร์แกเนลล์ต่าง ๆ เช่น ไมโทคอนเดรีย เอนโดพลาสมิกเรติคูลัม และกอลจิคอมเพล็กซ์จำนวนมาก บริเวณรอบตัวเซลล์มีเส้นใยประสาทซึ่งเป็นส่วนของเซลล์ที่ยื่นออกไป มีลักษณะเป็นแขนงเล็ก ๆ เส้นใยประสาทแบ่งได้ดังนี้
  - **เดนไดรต์** (dendrite) คือ เส้นใยประสาทที่รับกระแสประสาท โดยเซลล์ประสาทแต่ละเซลล์จะมีเดนไดรต์แยกออกจากตัวเซลล์ 1 เส้นใยหรือหลายเส้นใย
  - **แอกซอน** (axon) คือ เส้นใยประสาทที่ส่งกระแสประสาท โดยทั่วไปแอกซอนจะมีเพียง 1 เส้นใยเท่านั้น แอกซอนอาจสั้นหรือยาวได้ถึงกว่า 1 เมตร บริเวณตอนปลายของแอกซอนมีการแตกแขนง และที่ปลายสุดของแขนงที่แตกนั้นมีลักษณะโป่งออกคล้ายกระเปาะ

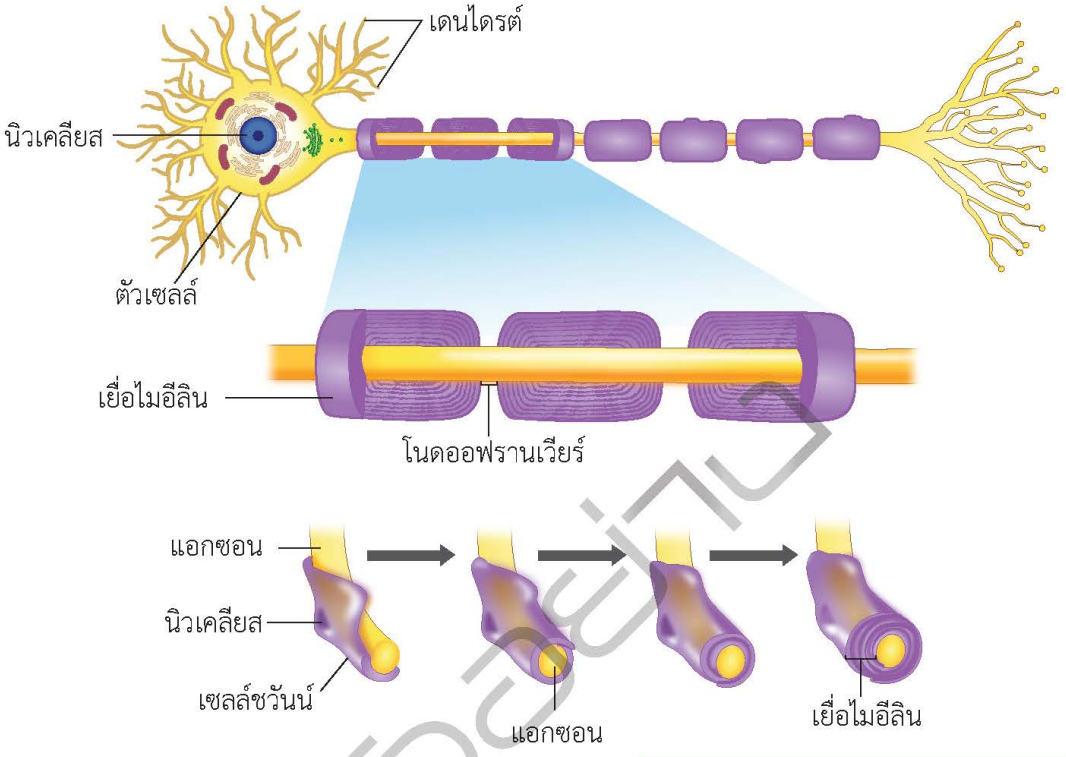


รูป 18.6 โครงสร้างเซลล์ประสาท
ก. รูปวาดเซลล์ประสาท ข. เซลล์ประสาทภายใต้กล้องจุลทรรศน์ใช้แสง

? เซลล์ประสาทมีโครงสร้างเหมือนหรือแตกต่างจากเซลล์อื่น ๆ ของร่างกายหรือไม่ อย่างไร

? ลักษณะของเซลล์ประสาทมีความสัมพันธ์กับการทำงานหรือไม่ อย่างไร

กรณีแอกซอนบางเส้นที่มีความยาวมาก ๆ มักจะพบ**เยื่อไมอีลิน** (myelin sheath) มาหุ้มตลอดความยาวของแอกซอน เยื่อไมอีลินมีสารกลุ่มลิพิดเป็นองค์ประกอบ เมื่อศึกษาภาคตัดขวางของเยื่อไมอีลินพบว่าเยื่อไมอีลินเกิดจาก**เซลล์ชวันน์** (Schwann cell) ซึ่งเป็นเซลล์เกลียชนิดหนึ่งพันรอบแอกซอนหลายรอบทำให้เกิดเป็นชั้นจำนวนมาก ส่วนของแอกซอนตรงบริเวณรอยต่อระหว่างเซลล์ชวันน์แต่ละเซลล์เป็นบริเวณที่ไม่มีเยื่อไมอีลินหุ้มเรียกว่า **โนดออฟรานเวียร์** (node of Ranvier) ดังรูป 18.7 การที่แอกซอนมีเยื่อไมอีลินหุ้มจะช่วยให้นำกระแสประสาทได้เร็วกว่าแอกซอนที่ไม่มีเยื่อไมอีลินหุ้ม

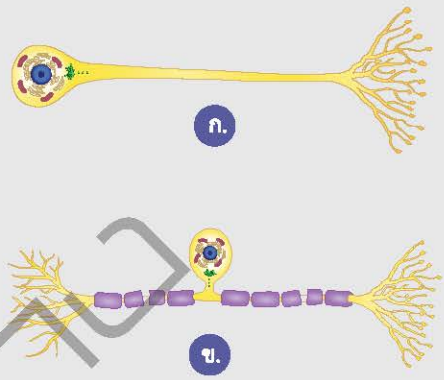


รูป 18.7 เซลล์ประสาทที่มีเยื่อไมอีลินหุ้ม

- **เซลล์เกลีย** เป็นเซลล์ที่ทำหน้าที่ค้ำจุน ลำเลียงของเสียออกจากเซลล์ประสาท รักษาดุลยภาพของสารต่าง ๆ ของเซลล์ประสาท เซลล์เกลียมีจำนวนมากกว่าเซลล์ประสาทถึง 50 เท่า และมีหลายชนิดพบได้ทั้งในระบบประสาทส่วนกลางและระบบประสาทรอบนอก เซลล์เกลียแต่ละชนิดมีหน้าที่แตกต่างกัน เช่น เซลล์ชวันน์ที่ระบบประสาทรอบนอกมีหน้าที่สร้างเยื่อไมอีลินซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าล้อมรอบแอกซอน ส่วน**เซลล์โอลิโกเดนโดรไซต์** (oligodendrocyte) ที่ระบบประสาทส่วนกลางมีหน้าที่เช่นเดียวกับเซลล์ชวันน์

จากการศึกษาโครงสร้างของเซลล์ประสาทพบว่ามีรูปร่างและเส้นใยประสาทแตกต่างกันไปตามชนิดและหน้าที่ของเซลล์ ถ้าใช้จำนวนเส้นใยประสาทต่อ 1 เซลล์ประสาทเป็นหลัก อาจแบ่งเซลล์ประสาทได้เป็น 3 ชนิด ดังรูป 18.8-18.10

1. เซลล์ประสาทขั้วเดียว (unipolar neuron) มีเส้นใยประสาทแยกออกมาจากตัวเซลล์เพียง 1 เส้นใย คือ แอกซอน พบในเซลล์ประสาทที่หลั่งฮอร์โมนของสัตว์ต่าง ๆ เซลล์ประสาทในกลุ่มนี้ยังมี **เซลล์ประสาทขั้วเดียวเทียม** (pseudounipolar neuron) ซึ่งเป็นเซลล์ที่มีแอกซอนออกจากตัวเซลล์เส้นใยเดียวแล้วแตกออกเป็น 2 เส้น โดยเส้นใยหนึ่งตรงปลายแตกแขนงเป็นเดนไดรต์ไปรับสัญญาณจากหน่วยรับความรู้สึกที่ส่วนต่าง ๆ ของร่างกายแล้วส่งผ่านข้อมูลให้กับเซลล์ประสาทอีกเซลล์ในไขสันหลัง พบที่ปมประสาทรากบนในไขสันหลัง

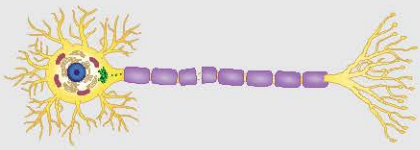


รูป 18.8 ก. เซลล์ประสาทขั้วเดียว
ข. เซลล์ประสาทขั้วเดียวเทียม

2. เซลล์ประสาทสองขั้ว (bipolar neuron) มีเส้นใยประสาทแยกออกจากตัวเซลล์ 2 เส้นใย เป็นแอกซอน 1 เส้น และอีกเส้นเป็นเดนไดรต์ พบที่อวัยวะรับความรู้สึกบางแห่ง เช่น เซลล์ประสาทที่บริเวณเรตินา เซลล์ประสาทรับกลิ่นในช่องจมูก เซลล์ประสาทรับความรู้สึกที่หูส่วนใน

รูป 18.9 เซลล์ประสาทสองขั้ว

3. เซลล์ประสาทหลายขั้ว (multipolar neuron) มีเดนไดรต์แยกออกมาจากตัวเซลล์จำนวนมากและมีแอกซอน 1 เส้นใย เซลล์ประสาทส่วนใหญ่เป็นเซลล์ประสาทหลายขั้ว เช่น เซลล์ประสาทประสานงานและเซลล์ประสาทสั่งการ



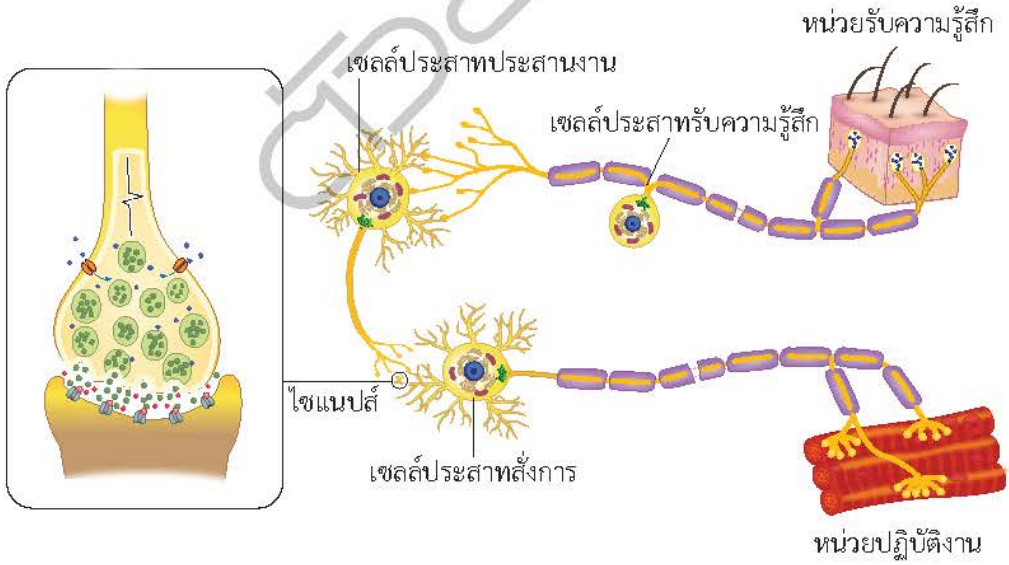
รูป 18.10 เซลล์ประสาทหลายขั้ว

ตัวอย่าง

นอกจากนี้ยังจำแนกเซลล์ประสาทตามหน้าที่ออกได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่

1. **เซลล์ประสาทรับความรู้สึก** (sensory neuron) ทำหน้าที่รับกระแสประสาทจากหน่วยรับความรู้สึกแล้วถ่ายทอดต่อไปยังเซลล์ประสาทอื่น
2. **เซลล์ประสาทสั่งการ** (motor neuron) บางเซลล์อาจมีแอกซอนที่ยาวซึ่งอาจยาวกว่า 1 เมตร เพราะเซลล์ประสาทนี้จะอยู่ที่ไขสันหลังซึ่งต้องนำกระแสประสาทออกจากไขสันหลังไปยังหน่วยปฏิบัติงาน เช่น กล้ามเนื้อแขน ขา ซึ่งอยู่ห่างจากไขสันหลังมาก
3. **เซลล์ประสาทประสานงาน** (association neuron) ส่วนใหญ่พบในสมองและไขสันหลัง ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างเซลล์ประสาทรับความรู้สึกกับเซลล์ประสาทสั่งการ

เซลล์ประสาทแต่ละเซลล์จะสานต่อกันเป็นร่างแหเพื่อถ่ายทอดกระแสประสาทโดยส่วนปลายของแอกซอนที่แตกออกเป็นกิ่งก้านหลายเส้นใยประสาท แล้วไปอยู่ชิดกับตัวเซลล์ประสาทหรือส่วนของเดนไดรต์ของเซลล์ประสาทอื่นหรือเซลล์กล้ามเนื้อที่เป็นหน่วยปฏิบัติงาน ดังรูป 18.11 โดยบริเวณที่อยู่ชิดกันนั้นเรียกว่า **ไซแนปส์** (synapse) ซึ่งจะได้ศึกษาต่อไป



รูป 18.11 ไซแนปส์ระหว่างเซลล์ประสาทรับความรู้สึก เซลล์ประสาทประสานงานและเซลล์ประสาทสั่งการ

การที่เซลล์ประสาทสานต่อกันเป็นร่างแหทำให้สามารถถ่ายทอดกระแสประสาทไปเซลล์ประสาทอื่น ๆ ได้ **กระแสประสาทเกิดขึ้นได้อย่างไร และสามารถถ่ายทอดไปยังเซลล์ประสาทหรือเซลล์อื่น ๆ ได้อย่างไร**

18.2.2 การทำงานของเซลล์ประสาท

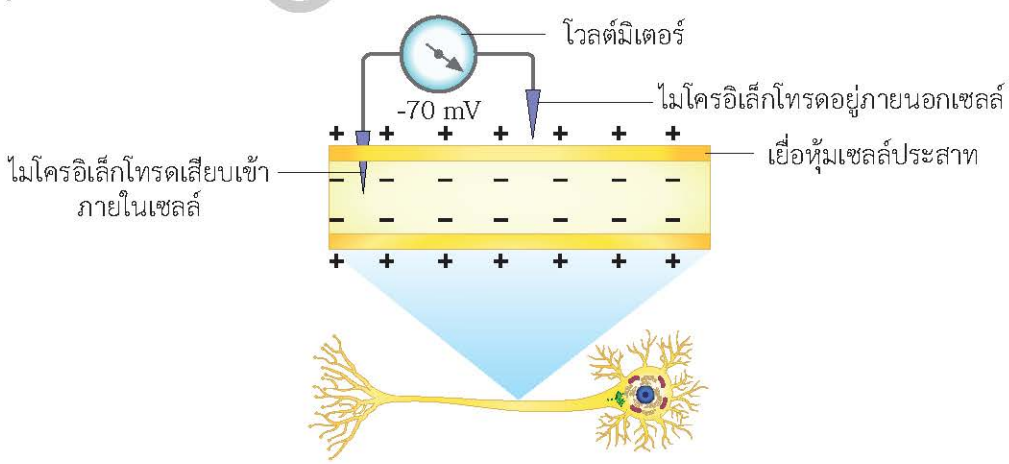
เซลล์ประสาทแต่ละเซลล์สามารถรับและส่งข้อมูลถึงกันได้เพราะมีกระแสประสาท มีการนำกระแสประสาท และการถ่ายทอดกระแสประสาท โดยกระแสประสาทนี้เป็นสัญญาณเคมีไฟฟ้าที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าที่เยื่อหุ้มเซลล์ประสาท เมื่อมีการกระตุ้นเซลล์ประสาทจะทำให้เกิดเป็นกระแสประสาทขึ้น

การเกิดกระแสประสาท

นักสรีรวิทยา อลัน ลอยด์ ฮอดจ์กิน (Alan Lloyd Hodgkin) และ แอนดรู ฟิลดิง ฮักซ์ลีย์ (Andrew Fielding Huxley) ได้ทดลองว่ากระแสประสาทเกิดขึ้นได้อย่างไรในแอกซอนของหมึก โดยการนำ**ไมโครอิเล็กโทรด** (microelectrode) ซึ่งมีลักษณะเป็นหลอดแก้วที่ดึงให้ยาว ตรงปลายเรียวเป็นท่อขนาดเล็กมาต่อกับ**โวลต์มิเตอร์** (voltmeter) เพื่อให้แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ จากนั้นเสียบปลายของไมโครอิเล็กโทรดเข้าไปในแอกซอนของหมึกและให้ปลายอีกข้างหนึ่งอยู่ด้านนอกของแอกซอนของหมึก ดังรูป 18.12

รู้หรือไม่

ความต่างศักย์ไฟฟ้า คือ ผลต่างของศักย์ไฟฟ้า ณ สองตำแหน่งใด ๆ

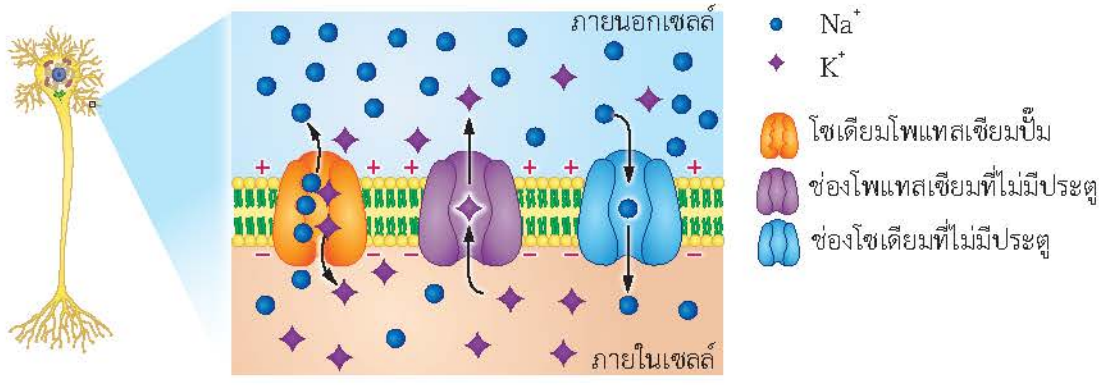


รูป 18.12 การวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างภายนอกและภายในเซลล์ประสาทของหมึก

เยื่อหุ้มเซลล์ประสาทเป็นฟอสโฟลิพิดจัดเรียงตัวเป็น 2 ชั้น จึงมีสมบัติป้องกันไม่ให้ไอออนผ่านเข้าออกได้อย่างอิสระ แต่เนื่องจากที่เยื่อหุ้มเซลล์มีโปรตีนแทรกอยู่ทั่วไปทำให้เกิดเป็นช่องที่ไอออนบางชนิดแพร่ผ่านเข้าหรือออกได้บ้างตามความแตกต่างของความเข้มข้นของไอออนเหล่านั้น เช่น ช่องโซเดียม ช่องโพแทสเซียม ซึ่งมีทั้งแบบ**ที่ไม่มีประตู** (ungated channel) และ**มีประตู** (gated channel)

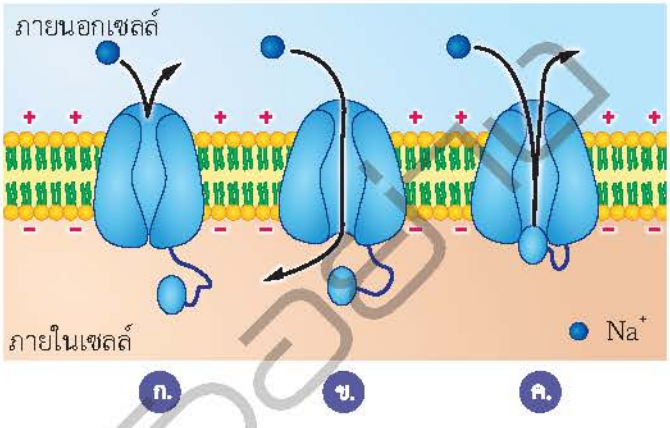
ในภาวะปกติที่เซลล์ประสาทยังไม่ถูกสิ่งเร้ากระตุ้น สารละลายภายนอกเซลล์และภายในเซลล์ประสาทจะมีไอออนต่างกัน โดยภายนอกเซลล์มีโซเดียมไอออน (Na^+) สูงกว่าภายในเซลล์ (ประมาณ 10 เท่า) ขณะเดียวกันภายในเซลล์จะมีโพแทสเซียมไอออน (K^+) สูงกว่าภายนอกเซลล์ (ประมาณ 30 เท่า) ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างเยื่อเซลล์ด้านในและด้านนอกมีค่าประมาณ -70 มิลลิโวลต์ ซึ่งเป็น**ศักย์ไฟฟ้าเยื่อเซลล์ระยะพัก** (resting membrane potential) เรียกว่าเกิด**ภาวะมีขั้ว** (polarization) เซลล์จะรักษาความเข้มข้นของไอออนที่ต่างกันนี้ตลอดเวลาโดยการทำงานของ**โซเดียมโพแทสเซียมปั๊ม** (sodium potassium pump; Na^+-K^+ pump) ซึ่งต้องใช้พลังงานจากการสลาย ATP ทำให้ Na^+ ถูกส่งออกไปนอกเซลล์ และ K^+ จะถูกดึงเข้ามาสะสมอยู่ภายในเซลล์ในอัตราส่วน $3Na^+ : 2K^+$ โดยที่โซเดียมโพแทสเซียมปั๊มต้องทำงานตลอดเวลา เนื่องจากยังมีการแพร่ของ Na^+ และ K^+ ผ่านทางช่องไอออนที่ไม่มีประตูตามความแตกต่างของความเข้มข้นของไอออน ดังรูป 18.13 ในระยะพักนี้ช่องไอออนที่มีประตูจะปิด

แม้ว่า K^+ จะเข้ามาสะสมอยู่ภายในเซลล์เป็นจำนวนมากก็ตาม แต่เนื่องจากภายในเซลล์ยังมีสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่เป็นจำนวนมาก เช่น โปรตีน กรดนิวคลีอิก ซึ่งไม่สามารถผ่านออกไปนอกเซลล์ได้ และสารเหล่านี้มีประจุลบจึงทำให้ภายในเซลล์มีผลรวมของประจุเป็นลบเมื่อเทียบกับภายนอกเซลล์



รูป 18.13 โซเดียมโพแทสเซียมปั๊ม ช่องโพแทสเซียมที่ไม่มีประตู และช่องโซเดียมที่ไม่มีประตู

ถ้ามีสิ่งเร้ามากระตุ้นจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าเยื่อเซลล์เปลี่ยนไปเนื่องจากเยื่อหุ้มเซลล์ยังประกอบด้วยช่องไอออนที่มีประตู ซึ่งช่องไอออนนี้สามารถปิดหรือเปิดได้ ทำให้สมบัติการยอมให้ไอออนผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์เปลี่ยนไป และทำให้เกิดกระแสประสาทของเซลล์ประสาทขึ้น โดยช่องไอออนที่มีประตูพบที่บริเวณแอกซอนของเซลล์ประสาทส่วนใหญ่จะเป็นช่องที่ต้องใช้สัญญาณไฟฟ้าในการปิดหรือเปิดประตู (voltage-gated ion channel) ซึ่งในระยะพัก**ช่องโซเดียมที่มีประตู** (voltage-gated Na^+ channel) และ**ช่องโพแทสเซียมที่มีประตู** (voltage-gated K^+ channel) จะปิด ทั้งนี้ช่องโซเดียมที่มีประตูจะมี 3 สถานะ ดังรูป 18.14 ขณะที่ช่องโพแทสเซียมที่มีประตูมี 2 สถานะ คือ ปิด และเปิด



รูป 18.14 ลำดับการเปลี่ยนสถานะของช่องโซเดียมที่มีประตู

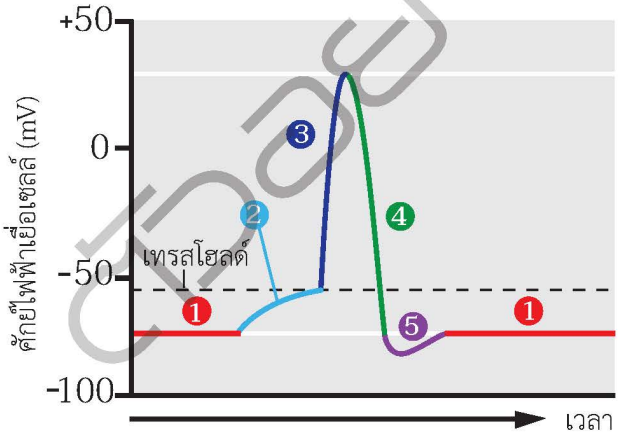
ก. สถานะ "ปิดแบบพร้อมใช้งาน" ซึ่งสามารถเปิดได้เมื่อได้รับการกระตุ้น พบในระยะพัก

ข. สถานะ "เปิด"เมื่อได้รับการกระตุ้น

ค. สถานะ "ปิดแบบไม่พร้อมใช้งาน (inactivation)" ซึ่งไม่สามารถเปิดได้แม้ได้รับการกระตุ้น แต่จะปรับเป็นสถานะ "ปิดแบบพร้อมใช้งาน" (ก) เมื่อศักย์ไฟฟ้าเยื่อเซลล์ต่ำลงกว่าปกติ

เมื่อมีสิ่งเร้า เช่น เสียง ความร้อน หรือสารเคมีมากระตุ้นเซลล์ประสาท การกระตุ้นนี้ทำให้ไอออนบางชนิดผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ระหว่างภายในและภายนอกเซลล์เปลี่ยนไป โดยถ้าความต่างศักย์บริเวณแอกซอนเปลี่ยนถึงจุดหนึ่งหรือ**เทรสโฮลด์** (threshold) สมบัติของเยื่อหุ้มเซลล์จะเปลี่ยนแปลงชั่วคราวคือ ช่องโซเดียมที่มีประตูเปิด ยอมให้โซเดียมไอออนผ่านเข้าทางช่องโซเดียมที่มีประตูนี้ได้ ศักย์ไฟฟ้าเยื่อเซลล์ด้านในบริเวณที่โซเดียมไอออนผ่านเข้าเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นประจุบวกมากขึ้นเมื่อเทียบกับภายนอกเซลล์ ทำให้ศักย์ไฟฟ้าเยื่อเซลล์เปลี่ยนจาก -70 มิลลิโวลต์ เป็นประมาณ +30 มิลลิโวลต์ เรียกว่า **ดีโพลาไรเซชัน** (depolarization) โดยการเปลี่ยนแปลงขั้นนี้จะเกิดอย่างรวดเร็ว

เมื่อเกิดดีโพลาไรเซชันแล้วทำให้ช่องโซเดียมที่มีประตูเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะปิดแบบไม่พร้อมใช้งาน ดังรูป 18.14 ค. ในขณะเดียวกันช่องโพแทสเซียมที่มีประตูจะเปิดยอมให้ K^+ ผ่านออกไปนอกเซลล์ ทำให้ศักย์ไฟฟ้าเยื่อเซลล์จาก +30 มิลลิโวลต์ลดลงและกลายเป็นค่าลบในสภาพเดิมเรียกว่า **รีโพลาไรเซชัน** (repolarization) และค่าความต่างศักย์นี้จะลดต่ำลงกว่าภาวะปกติเรียกว่า **ไฮเพอร์โพลาไรเซชัน** (hyperpolarization) ก่อนที่ช่องโพแทสเซียมที่มีประตูจะปิด จากนั้นศักย์ไฟฟ้าเยื่อเซลล์กลับเข้าสู่ระยะพัก เรียกภาวะที่ศักย์ไฟฟ้าเยื่อเซลล์เปลี่ยนไปนี้ว่า **แอกชันโพเทนเชียล** (action potential) ซึ่งสรุปได้ดังรูป 18.15–18.16 การเกิดแอกชันโพเทนเชียลจะเกิดขึ้นต่อเมื่อดีโพลาไรเซชันถึงระดับเทรสโฮลด์เท่านั้นและถ้าไม่ถึงเทรสโฮลด์ก็จะไม่เกิดแอกชันโพเทนเชียล การเกิดแอกชันโพเทนเชียลต้องอาศัยช่วงเวลาหนึ่ง ดังนั้นถ้ากระตุ้นเซลล์ประสาทในขณะที่ยังเกิดแอกชันโพเทนเชียลอยู่ หรือในขณะที่ยังเกิดไฮเพอร์โพลาไรเซชันอยู่ เซลล์ประสาทจะไม่ตอบสนองจึงไม่เกิดกระแสประสาทระลอกใหม่ขึ้น



ipst.me/10792

รูป 18.15 กราฟแสดงการเกิดแอกชันโพเทนเชียล

ชวนคิด

? ถ้าไม่มี ATP เซลล์ประสาทจะรักษาศักย์ไฟฟ้าเยื่อเซลล์ระยะพักได้หรือไม่ เพราะเหตุใด