



หนังสือเรียน

รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์

ฟิสิกส์

ชั้น

มัธยมศึกษาปีที่ ๕ เล่ม ๓

ตามผลการเรียนรู้

กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)

ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑

จัดทำโดย

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงศึกษาธิการ

พิมพ์ครั้งที่ ๑

ISBN 978-616-362-817-6

จำนวน ๑๕๐,๐๐๐ เล่ม พ.ศ. ๒๕๖๒

จัดพิมพ์และจัดจำหน่ายโดย

ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ ๑๐๓๓๐

www.chulabook.com

ฝ่ายขายติดต่อ แผนกขายส่ง โทร. ๐-๒๓๗๔-๑๓๗๕-๖ โทรสาร ๐-๒๓๗๔-๑๓๗๔

พิมพ์ที่

สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โทร. ๐-๒๒๑๘-๓๕๕๑ โทรสาร ๐-๒๒๑๘-๓๕๕๐

www.cuprint.chula.ac.th

มีลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติ



ประกาศสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน
เรื่อง อนุญาตให้ใช้สื่อการเรียนรู้ในสถานศึกษา

ด้วยสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ได้จัดทำหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๕ เล่ม ๓ ตามผลการเรียนรู้ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑ สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน ได้พิจารณาแล้วอนุญาตให้ใช้ในสถานศึกษาได้

ประกาศ ณ วันที่ ๒๘ มกราคม พ.ศ. ๒๕๖๒

(นายบุญรักษ์ ยอดเพชร)

เลขาธิการคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน

คำนำ

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) มีอำนาจหน้าที่ในการพัฒนาหลักสูตรวิธีการเรียนรู้ การประเมินผล การจัดทำหนังสือเรียน แบบฝึกหัด และสื่อการเรียนรู้ทุกประเภทที่ใช้ประกอบการเรียนรู้ในกลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์

หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๕ เล่ม ๓ นี้ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จัดทำขึ้นตามผลการเรียนรู้ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑ เพื่อให้สถานศึกษาพิจารณาเทียบเคียงกับหลักสูตรของสถานศึกษา และพิจารณาเลือกใช้หนังสือนี้ประกอบการจัดการเรียนรู้ให้สอดคล้องกับหลักสูตรสถานศึกษาของตนได้ตามความเหมาะสม

สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐานหวังเป็นอย่างยิ่งว่า หนังสือเรียนเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการจัดการเรียนรู้ในรายวิชาเพิ่มเติม กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ ขอขอบคุณสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตลอดจนบุคคลและหน่วยงานอื่น ๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการจัดทำไว้ ณ โอกาสนี้



(นายบุญรักษ์ ยอดเพชร)

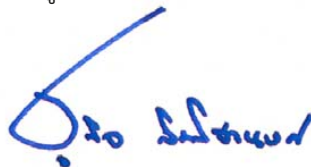
เลขาธิการคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน

คำชี้แจง

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ได้จัดทำตัวชี้วัดและสาระการเรียนรู้แกนกลาง กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑ โดยมีจุดเน้นเพื่อพัฒนาผู้เรียนให้มีความรู้ความสามารถที่ทัดเทียมกับนานาชาติ ได้เรียนรู้ วิทยาศาสตร์ที่เชื่อมโยงความรู้กับกระบวนการ ใช้กระบวนการสืบเสาะหาความรู้และแก้ปัญหาที่หลากหลาย มีการทำกิจกรรมด้วยการลงมือปฏิบัติเพื่อให้ผู้เรียนได้ใช้ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์และทักษะ แห่งศตวรรษที่ ๒๑ ซึ่งในปีการศึกษา ๒๕๖๑ เป็นต้นไป โรงเรียนจะต้องใช้หลักสูตรกลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) สสวท. จึงได้จัดทำหนังสือเรียนที่เป็นไปตามมาตรฐานหลักสูตรเพื่อให้โรงเรียน ได้ใช้สำหรับจัดการเรียนการสอนในชั้นเรียน

หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๕ เล่ม ๓ นี้ มีผลการเรียนรู้และ สาระการเรียนรู้เพิ่มเติมที่ครอบคลุมเนื้อหาบางส่วนที่ปรากฏตามตัวชี้วัดของรายวิชาพื้นฐานวิทยาศาสตร์ วิทยาศาสตร์กายภาพ เล่ม ๒ โดยเมื่อผู้เรียนเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์ เล่ม ๑ - เล่ม ๖ ครบทุกชั้นปี ในชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๔ - ๖ แล้วจะสามารถบรรลุผลสัมฤทธิ์ตามตัวชี้วัดของรายวิชาพื้นฐานวิทยาศาสตร์ วิทยาศาสตร์กายภาพ เล่ม ๒ ได้ และในขณะเดียวกันก็สามารถต่อยอดเนื้อหาจากรายวิชาพื้นฐานไปสู่เนื้อหา ในรายวิชาเพิ่มเติมได้โดยไม่ต้องเสียเวลาเรียนซ้ำซ้อน ทั้งนี้หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์ เล่ม ๓ นี้ มีเนื้อหาที่จำเป็นต้องเรียนประกอบด้วยเรื่องการสั้น คลื่น แสงเชิงคลื่น และแสงเชิงรังสี ซึ่งเป็นพื้นฐาน ที่สำคัญสำหรับการศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาในด้านวิทยาศาสตร์ หรือประกอบอาชีพในสาขาที่ใช้วิทยาศาสตร์ เป็นฐาน เช่น แพทย์ ทันตแพทย์ สัตวแพทย์ เทคโนโลยีชีวภาพ เทคนิคการแพทย์ วิศวกรรม สถาปัตยกรรม วัสดุศาสตร์ อุตุนิยมวิทยา ธรณีวิทยา ฯลฯ โดยเน้นกระบวนการคิดวิเคราะห์และการแก้ปัญหา เชื่อมโยงความรู้ สู่การนำไปใช้ในชีวิตจริง ผู้เรียนจะได้ทำกิจกรรมที่เป็นพื้นฐานที่สำคัญ รวมทั้งกิจกรรมที่ผู้เรียนสามารถคิดค้น และออกแบบการทดลองด้วยตนเอง มีแบบฝึกหัดเพื่อให้ตรวจทานความรู้หลังจากที่เรียนไปแล้ว รวมทั้งสรุป ความรู้ในแต่ละบทด้วย ในการจัดทำหนังสือเรียนเล่มนี้ ได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดีจากผู้ทรงคุณวุฒิ นักวิชาการอิสระ คณาจารย์ทั้งหลาย รวมทั้งครูผู้สอน นักวิชาการจากสถาบัน และสถานศึกษาทั้งภาครัฐ และเอกชน จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

สสวท. หวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์ เล่ม ๓ นี้ จะเป็นประโยชน์ แก่ผู้เรียน และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกฝ่าย ที่จะช่วยให้การจัดการศึกษาด้านวิทยาศาสตร์มีประสิทธิภาพและประสิทธิผล หากมีข้อเสนอแนะใดที่จะทำให้หนังสือเรียนเล่มนี้ มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โปรดแจ้ง สสวท. ทราบด้วย จะขอบคุณยิ่ง



(ศาสตราจารย์ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

ผู้อำนวยการสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
กระทรวงศึกษาธิการ

ข้อเสนอแนะทั่วไปในการใช้หนังสือเรียน

หนังสือเรียนเป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อให้นักเรียนได้ใช้ในการศึกษาเนื้อหาที่สำคัญและเกิดทักษะที่จำเป็นที่สอดคล้องกับมาตรฐานและสาระการเรียนรู้ รวมทั้งยังมีสื่อที่ช่วยเสริมการเรียนรู้ของนักเรียน โดยสามารถเชื่อมโยงไปยังหน้าเว็บไซต์รายการสื่อได้จาก QR code หรือ URL ที่อยู่ประจำแต่ละบท การทำความเข้าใจเกี่ยวกับสัญลักษณ์หรือข้อความตามหัวข้อต่าง ๆ ที่ปรากฏในหนังสือเรียน จะช่วยให้นักเรียนใช้หนังสือเรียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสัญลักษณ์หรือข้อความตามหัวข้อต่าง ๆ ที่ปรากฏในหนังสือเรียน มีดังนี้

- คำถามสำคัญ
- จุดประสงค์การเรียนรู้
- ความรู้ก่อนเรียน
- ข้อสังเกต
- ขวนคิด
- กิจกรรม
- คำถามท้ายกิจกรรม
- กิจกรรมลองทำดู
- ความรู้เพิ่มเติม
- รู้หรือไม่
- สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน
- แบบฝึกหัดท้ายหัวข้อ
- แบบฝึกหัดท้ายบท



คำถามสำคัญ

คำถามประจำบทที่นักเรียนต้องอาศัยความรู้ทั้งหมดในบทเรียนในการตอบคำถาม ซึ่งนักเรียนควรตอบได้หลังจากได้เรียนรู้ในบทนั้นแล้ว



จุดประสงค์การเรียนรู้

เป้าหมายของการจัดการเรียนรู้ที่ต้องการให้นักเรียนเกิดความรู้หรือทักษะหลังจากผ่านกิจกรรมการจัดการเรียนรู้ในแต่ละหัวข้อ ซึ่งนักเรียนควรศึกษาทำความเข้าใจก่อนเริ่มเรียนรู้ในแต่ละหัวข้อ



ความรู้ก่อนเรียน

คำสำคัญหรือข้อความสั้น ๆ ที่เกี่ยวกับความรู้ที่นักเรียนควรมีสำหรับเป็นพื้นฐานของการศึกษาความรู้ใหม่ในแต่ละบท



ข้อสังเกต

ความรู้ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้นักเรียนเห็นแนวคิดสำคัญและความเชื่อมโยงของเนื้อหา



ชวนคิด

คำถามระหว่างเรียนที่เชื่อมโยงหรือต่อยอดความรู้เดิมที่ศึกษาแล้วกับความรู้ใหม่หรือความรู้ในศาสตร์อื่น เพื่อให้นักเรียนเห็นความสัมพันธ์หรือความต่อเนื่องของเนื้อหา



กิจกรรม

การปฏิบัติที่ช่วยในการเรียนรู้เนื้อหาหรือฝึกฝนให้เกิดทักษะตามจุดประสงค์การเรียนรู้ของบทเรียน โดยอาจเป็นการทดลอง การสืบค้นข้อมูล หรือกิจกรรมอื่น ๆ ซึ่งนักเรียนควรลงมือปฏิบัติกิจกรรมด้วยตนเอง



คำถามท้ายกิจกรรม

คำถามที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมนั้น ๆ ช่วยเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ อภิปรายและสรุปผลการทำกิจกรรม



กิจกรรมลองทำดู

การปฏิบัติที่ช่วยเสริมความรู้ที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาในบทเรียน ซึ่งอาจเป็นกิจกรรมที่ลงมือปฏิบัติในห้องเรียนหรือนอกเวลาเรียนได้



ความรู้เพิ่มเติม

ความรู้ที่เพิ่มเติมจากเนื้อหาในบทเรียน เพื่อให้นักเรียนมีความรู้ความเข้าใจมากขึ้น โดยไม่มีการวัดและประเมินผล



รู้หรือไม่

ความรู้ที่เชื่อมโยงให้เห็นความสอดคล้องของเนื้อหาบทเรียนกับปรากฏการณ์หรือสถานการณ์ในชีวิตประจำวัน



สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

การสรุปเนื้อหาสำคัญภายในบทเรียน เพื่อช่วยให้เห็นภาพรวมของเนื้อหาทั้งหมด

แบบฝึกหัดท้ายหัวข้อ

ประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้



คำถามตรวจสอบความเข้าใจ

คำถามระหว่างเรียนที่ช่วยประเมินการเรียนรู้ ซึ่งนักเรียนสามารถใช้ตรวจสอบว่า ตนเองมีความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาแล้วหรือยัง



แบบฝึกหัด

แบบฝึกหัดระหว่างเรียนที่ช่วยฝึกทักษะการคิด การคำนวณ และการแก้ปัญหาเบื้องต้น โดยใช้ความรู้ในหัวข้อนั้น ๆ ซึ่งนักเรียนสามารถใช้ตรวจสอบความเข้าใจของเนื้อหา และฝึกฝนตนเองให้มีทักษะที่จำเป็นตามจุดประสงค์การเรียนรู้ได้

แบบฝึกหัดท้ายบท

ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้



คำถาม

คำถามที่เน้นให้นักเรียนตอบโดยการเขียนบรรยายแสดงความเข้าใจจนถึงการวิเคราะห์



ปัญหา

ปัญหาที่มีความซับซ้อนน้อยจนถึงปานกลาง เน้นให้นักเรียนได้ใช้ทักษะการคำนวณ และการแก้ปัญหา



ปัญหาท้าทาย

ปัญหาที่มีความซับซ้อนมาก เน้นให้นักเรียนได้ใช้ทักษะการคิดระดับสูงในการคำนวณ และการแก้ปัญหา

8

การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

8.1	ลักษณะการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย	3
8.2	ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย	5
8.2.1	การกระจัดของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย	6
8.2.2	ความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย	10
8.3	แรงกับการสั่นของมวลติดปลายสปริงและลูกตุ้มอย่างง่าย	15
8.3.1	การสั่นของมวลติดปลายสปริง	15
8.3.2	การแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย	26
8.4	ความถี่ธรรมชาติและการสั่นพ้อง	33
	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	37
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 8	39

9

คลื่น

9.1	ธรรมชาติของคลื่น	49
9.1.1	การเกิดคลื่น	50
9.1.2	ชนิดของคลื่น	51
9.1.3	ส่วนประกอบของคลื่น	56
9.2	อัตราเร็วของคลื่น	61
9.2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็ว ความถี่ และความยาวคลื่น	61
9.2.2	อัตราเร็วของคลื่นในตัวกลาง	63
9.3	หลักการที่เกี่ยวกับคลื่น	69
9.3.1	หลักการของฮอยเกนส์	69
9.3.2	หลักการซ้อนทับ	72

สารบัญ	บทที่ 9-11	
บทที่	เนื้อหา	หน้า
	9.4 พฤติกรรมของคลื่น	77
	9.4.1 การสะท้อนของคลื่น	77
	9.4.2 การหักเหของคลื่น	82
	9.4.3 การแทรกสอดของคลื่น	87
	9.4.4 การเลี้ยวเบนของคลื่น	96
	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	100
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 9	102

10	แสงเชิงคลื่น	
	10.1 แนวคิดเกี่ยวกับแสงเชิงคลื่น	107
	10.2 การแทรกสอดของแสงผ่านสลิตคู่	109
	10.3 การเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยว	126
	10.4 การเลี้ยวเบนของแสงผ่านเกรตติง	138
	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	148
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 10	150

11	แสงเชิงรังสี	
	11.1 การสะท้อนและการหักเหของแสง	160
	11.1.1 การสะท้อนของแสง	160
	11.1.2 การหักเหของแสง	165
	11.2 การมองเห็นและการเกิดภาพ	178
	11.2.1 การมองเห็น	178
	11.2.2 การเกิดภาพ	179
	11.3 ภาพจากเลนส์บางและกระจกเงาทรงกลม	187
	11.3.1 การเกิดภาพจากเลนส์บาง	187
	11.3.2 การคำนวณเกี่ยวกับเลนส์บาง	198
	11.3.3 การเกิดภาพจากกระจกเงาทรงกลม	205
	11.3.4 การคำนวณเกี่ยวกับกระจกเงาทรงกลม	212

สารบัญ

บทที่ 11-ภาคผนวก

บทที่	เนื้อหา	หน้า
11.4	แสงสีและการมองเห็นแสงสี	218
11.4.1	การมองเห็นสีของมนุษย์	218
11.4.2	การผสมแสงสี	220
11.4.3	แผ่นกรองแสงและสีของวัตถุ	223
11.4.4	การผสมสารสี	226
11.5	การอธิบายปรากฏการณ์ธรรมชาติและการใช้ประโยชน์เกี่ยวกับแสง	228
11.5.1	ปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกี่ยวกับแสง	228
11.5.2	การนำความรู้เรื่องกระจกเงาและเลนส์บางไปใช้ประโยชน์	235
	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	244
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 11	247

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก	คณิตศาสตร์สำหรับฟิสิกส์	262
ภาคผนวก ข	ระบบหน่วยระหว่างชาติ	272
ภาคผนวก ค	ตารางฟังก์ชันตรีโกณมิติ	275
ภาคผนวก ง	ตารางเลขกำลังสองรากที่สองและส่วนกลับ	276
ภาคผนวก จ	ตัวอย่างการบันทึกการทดลอง	277
ภาคผนวก ฉ	ลอกการิทึม	280
	คำศัพท์	283
	บรรณานุกรม	285
	ที่มาของรูป	286
	คณะกรรมการจัดทำหนังสือเรียน	287
	คำอธิบายรายวิชาเพิ่มเติม	290

บทที่



ipst.me/8887

8

การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย



การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของลูกตุ้มนาฬิกาที่ใช้บอกเวลาหรือใช้หาค่าความเร่งเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลกได้ แม้กระทั่งการแกว่งของชิงช้า เราสามารถอธิบายแรงและลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุในสถานการณ์เหล่านี้ได้อย่างไร และความเข้าใจในเรื่องเหล่านี้ จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันได้อย่างไร



คำถามสำคัญ

- การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายมีลักษณะอย่างไร
- การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันอย่างไรบ้าง



จุดประสงค์การเรียนรู้

8.1 ลักษณะการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

1. อธิบายลักษณะการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

8.2 ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

2. อธิบายการกระจัด ความเร็ว และความเร่งของวัตถุที่เคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย
3. คำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

8.3 แรงกับการสั่นของมวลติดปลายสปริงและลูกตุ้มอย่างง่าย

4. อธิบายผลของแรงกับการสั่นของมวลติดปลายสปริงและการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย
5. ทดลองการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายของรถทดลองติดปลายสปริง
6. ทดลองการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย
7. คำนวณปริมาณที่เกี่ยวข้องกับคาบการสั่นของมวลติดปลายสปริงและการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย

8.4 ความถี่ธรรมชาติและการสั่นพ้อง

8. อธิบายความถี่ธรรมชาติของวัตถุและการเกิดการสั่นพ้อง



ความรู้ก่อนเรียน

การเคลื่อนที่แนวตรง การเคลื่อนที่แบบวงกลม กฎการเคลื่อนที่ข้อสองของนิวตัน เวกเตอร์

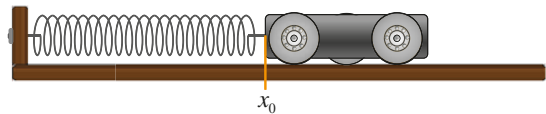
การโคจรของดาวเทียมรอบโลก การแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกาโบราณ การสั่นของแผ่นไดอะแฟรม ลำโพง การสั่นของสายกีตาร์ การสั่นของมวลติดปลายสปริง สถานการณ์เหล่านี้เป็นการเคลื่อนที่เป็นคาบ โดยวัตถุจะเคลื่อนที่ตามเส้นทางเดิมกลับมาที่เริ่มต้นซ้ำแล้วซ้ำอีก โดยเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ครบรอบมีค่าคงตัว ความเข้าใจเรื่องการเคลื่อนที่เป็นคาบ เป็นพื้นฐานสำคัญต่อการศึกษาเรื่อง คลื่น เสียง แสง และไฟฟ้ากระแสสลับ

การโคจรของดาวเทียมรอบโลก การสั่นของมวลติดปลายสปริง การเคลื่อนที่ข้างต้นเป็นการเคลื่อนที่เป็นคาบเหมือนกัน โดยดาวเทียมจะเคลื่อนที่วนกลับมาที่ตำแหน่งเดิม ส่วนมวลติดสปริงเคลื่อนที่กลับไปกลับมาผ่านตำแหน่งกึ่งกลาง เรียกการเคลื่อนที่นี้ว่า **การสั่น (vibration)** หรือ **การแกว่งกวัด (oscillation)** ทั้งสองคำนี้หมายถึงการเคลื่อนที่เดียวกัน ในบทนี้เน้นการเข้าใจการสั่นแบบที่ง่ายที่สุด เรียกว่า **การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย (simple harmonic motion)**

8.1 ลักษณะการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

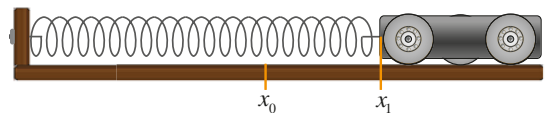
พิจารณาการเคลื่อนที่ของรถทดลองติดปลายสปริงที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูปต่อไปนี้

รถทดลองติดปลายสปริงวางอยู่บนพื้น ล้อของรถทดลองหมุนคล่อง ซึ่งประมาณได้ว่าแรงเสียดทานไม่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของรถทดลอง ให้ตำแหน่ง x_0 รถทดลองอยู่นิ่งสปริงไม่ยืดตัวและไม่หดตัว เรียกตำแหน่งนี้ว่า **ตำแหน่งสมดุล (equilibrium position)** ดังรูป 8.1 ก.



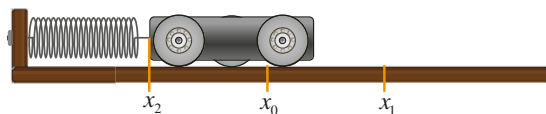
รูป 8.1 ก. รถทดลองติดปลายสปริง และอยู่ที่ตำแหน่งสมดุล x_0

ดึงรถทดลองให้เคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งสมดุลไปทางขวาที่ตำแหน่ง x_1 ดังรูป 8.1 ข. และให้ตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งเริ่มต้นที่เวลา $t = t_0$



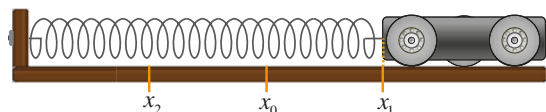
รูป 8.1 ข. ตำแหน่งรถทดลองที่เวลา $t = t_0$

ปล่อยมือให้รถทดลองเคลื่อนที่จากหยุดนิ่งไปทางซ้าย ผ่านตำแหน่งสมดุล โดยขณะผ่านตำแหน่งสมดุลรถทดลองมีอัตราเร็วสูงสุด จนกระทั่งที่เวลา $t = t_1$ รถทดลองมีอัตราเร็วเป็นศูนย์ที่ตำแหน่ง x_2 และกำลังจะเคลื่อนที่กลับมาทางด้านขวา ดังรูป 8.1 ค.



รูป 8.1 ค. ตำแหน่งรถทดลองที่เวลา $t = t_1$

รถทดลองเคลื่อนที่กลับมายังตำแหน่งเริ่มต้นที่เวลา $t = t_2$ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ ดังรูป 8.1 ง.



รูป 8.1 ง. ตำแหน่งรถทดลองที่เวลา $t = t_2$

เวลาที่รถทดลองใช้ในการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นจนกลับมาถึงตำแหน่งเดิมเป็นเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ เรียกว่า คาบ (period) แทนด้วย T ซึ่งพิจารณา ความถี่ (frequency) ของการเคลื่อนที่ได้จาก $f = \frac{1}{T}$

ขณะรถทดลองอยู่ที่ตำแหน่งใด ๆ $x = x_i$ สามารถบอกการกระจัดของรถทดลองอ้างอิงกับตำแหน่งสมดุล ($x = x_0 = 0$) โดยเขียนเวกเตอร์บอกตำแหน่ง (position vector) ในหนึ่งมิติที่มีทิศทางจากตำแหน่งสมดุลไปยังตำแหน่งของรถทดลองขณะนั้น ๆ เรียกเวกเตอร์นี้ว่า การกระจัด (displacement) ของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย แทนด้วย \vec{x}

จากรูป 8.1 ข และ ค ที่ตำแหน่ง x_1 และ x_2 เป็นตำแหน่งที่รถทดลองอยู่ห่างจากตำแหน่งสมดุลมากที่สุดหรือมีขนาดการกระจัดมากที่สุด เรียกขนาดการกระจัดสูงสุดนี้ว่า แอมพลิจูด (amplitude) แทนด้วย A

การเคลื่อนที่ของรถทดลองติดปลายสปริงที่กล่าวมาในข้างต้น เป็นการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาซ้ำรอยเดิมผ่านตำแหน่งสมดุล โดยมีแอมพลิจูดและคาบคงตัว เรียกการเคลื่อนที่นี้ว่า การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

จากการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของรถทดลองติดปลายสปริง พบว่าการกระจัด ความเร็ว และความเร่งของรถทดลองเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ที่เวลาต่าง ๆ ของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ปริมาณดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร จะได้ศึกษาในหัวข้อถัดไป

ตัวอย่าง 8.1 วัตถุชิ้นหนึ่งติดที่ปลายสปริง มีตำแหน่งสมดุลที่ $x = 0$ ดึงวัตถุไปที่ตำแหน่ง $x = 0.1$ m จากตำแหน่งสมดุล แล้วปล่อยวัตถุพร้อมเริ่มจับเวลา พบว่าวัตถุเคลื่อนที่กลับมาที่ตำแหน่ง $x = 0.1$ m อีกครั้ง ใช้เวลา $t = 2.2$ s จงหา ก. แอมพลิจูด ข. คาบ ค. ความถี่

แนวคิด แอมพลิจูด (A) เป็นขนาดการกระจัดที่มากที่สุดและมีค่าเป็นบวก มีหน่วย เมตร คาบ (T) เป็นเวลาที่วัตถุใช้ในการเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ มีหน่วย วินาที และความถี่ (f) เป็นจำนวนรอบที่วัตถุเคลื่อนที่ได้ในหนึ่งหน่วยเวลา มีหน่วย ต่อวินาที หรือเฮิรตซ์

วิธีทำ ก. วัตถุมีขนาดการกระจัดที่มากที่สุด 0.1 m จากตำแหน่งสมดุล

ดังนั้นแอมพลิจูดเท่ากับ 0.1 m

ข. วัตถุใช้เวลา 2.2 s ในการเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ ดังนั้นคาบเท่ากับ 2.2 s

ค. วัตถุเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบใช้เวลา 2.2 s

ดังนั้น ความถี่ $= \frac{1}{2.2 \text{ s}} = 0.45 \text{ s}^{-1} = 0.45 \text{ Hz}$

ตอบ ก. แอมพลิจูดเท่ากับ 0.1 เมตร ข. คาบเท่ากับ 2.2 วินาที ค. ความถี่เท่ากับ 0.45 เฮิรตซ์



คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 8.1

1. การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายมีลักษณะอย่างไร
2. จงอธิบายตำแหน่งสมดุล
3. การเคลื่อนที่แบบวงกลมของจูกยวง การแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย เป็นการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายหรือไม่ เพราะเหตุใด



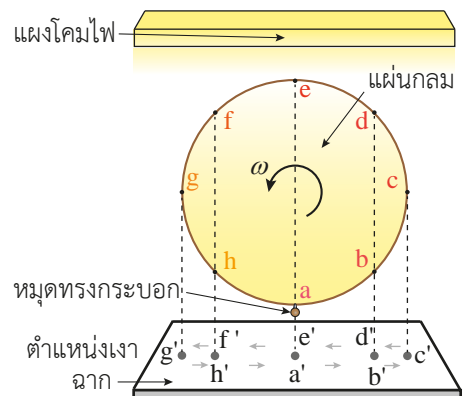
แบบฝึกหัด 8.1

1. ถ้าอนุภาคสั้นครบ 20 รอบ ในเวลา 40 วินาที จงหาความถี่และคาบการสั้นของอนุภาค
2. จงหาคาบต่อไปนี้ (ในหน่วยวินาที)
 - ก. ซีพจรเต้น 29 ครั้ง ใน 20 วินาที
 - ข. เครื่องยนต์หมุน 3200 รอบต่ออนาที
3. จงหาความถี่ของเหตุการณ์ต่อไปนี้ (ในหน่วยต่อวินาทีหรือเฮิร์ตซ์)
 - ก. สายซอลัน 43 รอบ ใน 0.1 วินาที
 - ข. ไข่มุกเครื่องปั้นอาหารหมุน 13000 รอบ ใน 1 นาที
4. คันเคาะเครื่องเคาะสัญญาณเวลาทำให้เกิดจุดบนแถบกระดาษ 1200 จุด ใน 1 นาที คาบและความถี่ของคันเคาะมีค่าเท่าใด (ในหน่วยวินาที และต่อวินาทีหรือเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ)

8.2 ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

แผ่นกลมรัศมี A มีหมุดทรงกระบอกติดอยู่ที่ขอบกำลังหมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุม ω ทำให้หมุดทรงกระบอกเคลื่อนที่เป็นวงกลมรัศมี A ด้วยอัตราเร็วเชิงมุม ω เช่นเดียวกับแผ่นกลม แผงโคมไฟฉายแสงในแนวตั้งทำให้เกิดเงาบนฉากด้านล่าง

พิจารณาหมุดทรงกระบอกเคลื่อนที่จาก a ซึ่งเป็นตำแหน่งเริ่มต้น ไป b ไป c ... และกลับมาที่ a ทำให้เกิดเงาของหมุดบนฉากด้านล่างในแนวระดับ โดยเงาเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในแนวตรงจาก a' ไป b' ไป c' ... และกลับมาที่ a' ตามลำดับ ดังรูป 8.2 จะพบว่าเงามีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาช้าร่อยเดิม มีคาบและแอมพลิจูดคงตัว ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย โดยมีตำแหน่ง a' หรือ e' เป็นตำแหน่งสมดุล จะสามารถหาการกระจัด ความเร็ว และความเร่งของวัตถุเป็นฟังก์ชันกับเวลาได้ดังนี้



รูป 8.2 เงาของหมุดที่ตำแหน่งต่าง ๆ

8.2.1 การกระจัดของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

พิจารณาการเคลื่อนที่ของหมุดทรงกระบอกเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้วยอัตราเร็วเชิงมุมคงตัว ω เมื่อเวลาใด ๆ (t) แผ่นกลมหมุนไปเป็นมุม θ เอง ของหมุด มีการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้น $x = 0$ ไปยังตำแหน่งใด ๆ (x_i) ดังรูป 8.3 เงานจะเคลื่อนที่ด้วยความถี่เชิงมุมเท่ากับอัตราเร็วเชิงมุมของหมุด ω การกระจัดของเงานเท่ากับ

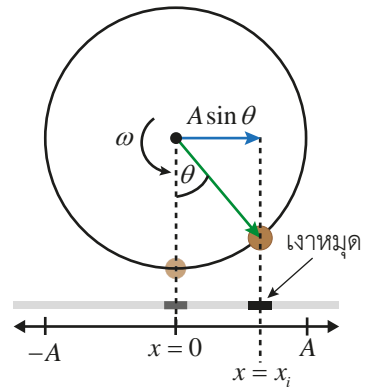
$$x = A \sin \theta$$

จาก $\theta = \omega t$ จะได้

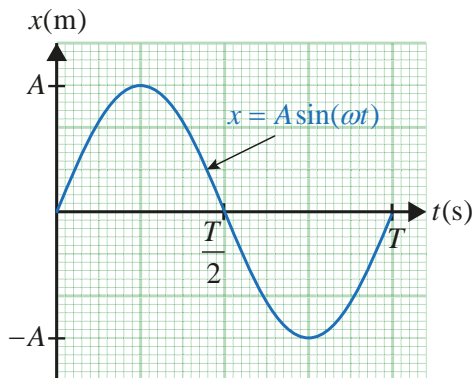
$$x = A \sin \omega t \quad (8.1)$$

การกระจัดมีทิศทางไปทางขวา

จากสมการ (8.1) การกระจัดกับเวลาของเงานี้ความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันลักษณะแบบไซน์ เขียนกราฟความสัมพันธ์ของการกระจัดของเงานับกับเวลา เมื่อเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ ได้ดังรูป 8.4



รูป 8.3 เปรียบเทียบตำแหน่งของหมุดกับการกระจัดของเงาน



รูป 8.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของเงานับกับเวลา



ข้อสังเกต

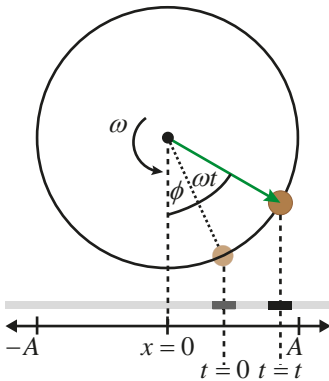
อัตราเร็วเชิงมุมกับความถี่เชิงมุม

อัตราเร็วเชิงมุม

กรณีวัตถุเคลื่อนที่ไปบนเส้นรอบวงวงกลมในช่วงเวลา Δt วัตถุจะมีการกระจัดเชิงมุม $\Delta \theta$ สามารถหาอัตราเร็วเชิงมุม (angular speed) ได้จากความสัมพันธ์ $\omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$ เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ $\Delta t = T$ จะได้ $\omega = \frac{2\pi}{T}$ และ $\omega = 2\pi f$

ความถี่เชิงมุม

กรณีเงาของหมุดทรงกระบอกเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ในช่วงเวลา Δt จะไม่ปรากฏมุม $\Delta\theta$ จึงไม่สามารถหา ω ได้จาก $\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ อย่างไรก็ตามสามารถหา ω ของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายได้จากความสัมพันธ์ $\omega = 2\pi f$ ดังนั้นในกรณีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายจะเรียก ω ว่า **ความถี่เชิงมุม** (angular frequency) มีหน่วยเป็น rad/s ในกรณีเป็นความสัมพันธ์กับปริมาณเชิงมุมจะใช้ rad/s ส่วนกรณีที่สัมพันธ์กับปริมาณเชิงเส้นจะใช้เป็น s^{-1}



รูป 8.5 ตำแหน่งหมุดทรงกระบอกที่เวลา $t = 0$
เฟสเริ่มต้นเท่ากับ ϕ และที่เวลา t ใด ๆ
มุมเฟสเท่ากับ $\phi + \omega t$

สมการ (8.2) สามารถนำไปใช้อธิบายการกระจัดของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายของวัตถุเป็นฟังก์ชันของเวลา

กรณีทั่วไป ตำแหน่งเริ่มต้น ($t = 0$) หมุดทรงกระบอกเคลื่อนที่จากจุด a ไปแล้วเป็นมุม ϕ เงาของหมุดไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่งสมดุล ($x = 0$) เรียกมุม ϕ ว่า **เฟสเริ่มต้น** ของเงา เมื่อเวลาผ่านไป t หมุดเคลื่อนที่ต่อไปจนเป็นมุม $\phi + \omega t$ ซึ่งเรียกว่า **มุมเฟส** (phase angle) ของเงาขณะนั้น ดังสมการ

$$\theta(t) = \phi + \omega t$$

เขียนสมการความสัมพันธ์การกระจัดของเงาที่ขึ้นกับเวลา ในรูปทั่วไปได้เป็น

$$x = A \sin(\omega t + \phi) \quad (8.2)$$

เมื่อ ϕ คือ เฟสเริ่มต้นหรือมุมเริ่มต้นที่เวลา $t = 0$

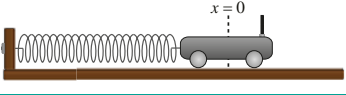
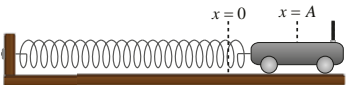


ข้อสังเกต

หน่วยของมุมเฟส

ในระบบเอสไอ มุมมีหน่วยเป็น เรเดียน (radian) เช่น มุม π เรเดียน มีค่าเท่ากับมุม 180 องศา มุม 2π เรเดียน มีค่าเท่ากับ มุม 360 องศา

ตัวอย่าง 8.2 จงเขียนสมการการกระจัดที่ขึ้นกับเวลาของรถทดลองติดปลายสปริงที่เคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายมีตำแหน่งเริ่มต้นที่จับเวลาต่างกันในตาราง กำหนดให้ ความถี่เชิงมุมเท่ากับ ω แอมพลิจูดเท่ากับ A

รูปแสดงตำแหน่งเริ่มต้นที่ $t = 0$	เฟสเริ่มต้น (ϕ)	สมการการกระจัด
ก. 		
ข. 		

แนวคิด หาเฟสเริ่มต้น ด้วยการแทนค่า $t = 0$ และการกระจัดที่เวลาเริ่มต้นในสมการ $x = A \sin(\omega t + \phi)$ จะได้ค่า ϕ ที่เวลาเริ่มต้น

วิธีทำ ก. จากตาราง เมื่อ $t = 0$ การกระจัดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ $x = 0$ จะได้

$$0 = A \sin(\omega(0) + \phi)$$

$$0 = \sin(\phi)$$

จาก $\sin(0) = 0$ จะได้ว่า $\phi = 0$

ข. จากตาราง เมื่อ $t = 0$ การกระจัดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ $x = A$ จะได้

$$A = A \sin(\omega(0) + \phi)$$

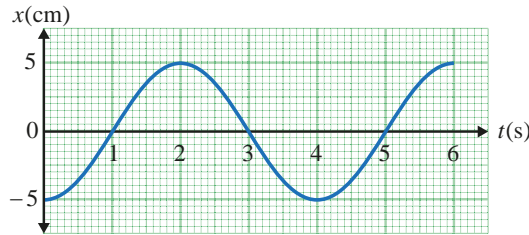
$$1 = \sin(\phi)$$

จาก $\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1$ จะได้ว่า $\phi = \frac{\pi}{2}$

เขียนสมการการกระจัดได้เป็น $x = A \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$

ตอบ ก. $\phi = 0, x = A \sin(\omega t)$ ข. $\phi = \frac{\pi}{2}, x = A \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$

ตัวอย่าง 8.3 วัตถุชิ้นหนึ่งที่มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายบนพื้นราบแนวระดับ กราฟระหว่าง การกระจัดกับเวลาเป็นดังรูป



รูป ประกอบตัวอย่าง 8.3

- ก. การกระจัดของวัตถุเป็นศูนย์ ที่เวลาใด
- ข. ที่เวลา $t = 2.5$ s การกระจัดของวัตถุมีค่าเท่าใด
- ค. ระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ทั้งหมดเป็นเท่าใด
- ง. ความเร็วของวัตถุมีค่าเป็นศูนย์ ที่เวลาใด

แนวคิด กราฟระหว่างการกระจัดกับเวลาของวัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย เป็นกราฟที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการกระจัดของวัตถุที่เวลาต่าง ๆ นอกจากนี้ยังใช้หาคาบ ความถี่ ระยะทางรวมทั้งความเร็วจากความชันได้อีกด้วย

- วิธีทำ**
- ก. จากกราฟ การกระจัดมีค่าเป็น 0 ที่เวลา $t = 1$ s, $t = 3$ s และ $t = 5$ s
 - ข. จากกราฟ ที่ $t = 2.5$ s การกระจัด (x) มีค่า 3.5 cm ดังนั้นการกระจัดของวัตถุมีค่า 3.5 cm
 - ค. ระยะทางระหว่างตำแหน่งสมดุลและตำแหน่งที่ขนาดการกระจัดสูงสุดเท่ากับ 5.0 cm ใช้เวลาเคลื่อนที่ 1 s ดังนั้นระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ทั้งหมดเท่ากับ 30.0 cm
 - ง. ที่ $t = 0$, $t = 2$ s, $t = 4$ s และ $t = 6$ s ความชันของกราฟเป็น 0 ดังนั้น วัตถุมีความเร็วเป็นศูนย์ที่เวลา 0, 2 s, 4 s และ 6 s

- ตอบ**
- ก. การกระจัดของวัตถุเป็นศูนย์ ที่เวลา 1 วินาที 3 วินาที และ 5 วินาที
 - ข. การกระจัดของวัตถุมีค่า 3.5 เซนติเมตร
 - ค. ระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ทั้งหมดเท่ากับ 30.0 เซนติเมตร
 - ง. ความเร็วของวัตถุมีค่าเป็นศูนย์ที่เวลา 0 วินาที 2 วินาที 4 วินาที และ 6 วินาที

ตัวอย่าง 8.4 อนุภาคหนึ่งมีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายมีการกระจัดเป็น $x = (0.10 \text{ m}) \sin(\pi t)$

- ก. จากสมการในโจทย์ จงระบุ มุมเฟส เฟสเริ่มต้น ความถี่เชิงมุม และแอมพลิจูด
- ข. ที่เวลา $t = 1.0$ วินาที มุมเฟสและการกระจัดของอนุภาคมีค่าเท่าใด

แนวคิด สมการการกระจัดของอนุภาค $x = A \sin(\omega t + \phi)$ มี A เป็นแอมพลิจูด ω เป็นความถี่เชิงมุม $\omega t + \phi$ เป็นมุมเฟส และ ϕ เป็นเฟสเริ่มต้น เมื่อแทนค่าปริมาณต่าง ๆ ในสมการการกระจัด จะหาค่าของ x ซึ่งเป็นการกระจัดของอนุภาคได้

วิธีทำ ก. เปรียบเทียบสมการ $x = (0.10 \text{ m})\sin(\pi t)$ กับ $x = A\sin(\omega t + \phi)$ จะได้

มุมเฟส	πt
เฟสเริ่มต้น	0
ความถี่เชิงมุม	$\pi \text{ rad/s}$
แอมพลิจูด	0.10 m

ข. ที่เวลา $t = 1.0 \text{ s}$

$$\text{มุมเฟส} = (\pi \text{ rad s}^{-1})(1.0 \text{ s}) = \pi \text{ radians}$$

การกระจัดของอนุภาค

$$\begin{aligned} x &= (0.10 \text{ m})\sin(\pi t) \\ &= (0.10 \text{ m})\sin(\pi) \\ &= 0 \end{aligned}$$

ตอบ ก. πt เรเดียน, 0, $\pi \text{ rad/s}$ และ 0.1 เมตร ตามลำดับ

ข. มุมเฟสและการกระจัดของอนุภาคมีค่า π เรเดียน และ 0 ตามลำดับ

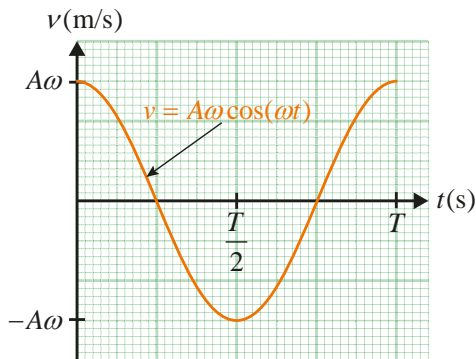
8.2.2 ความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

ความเร็วของเงาหาได้จากองค์ประกอบความเร็วของวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่แบบวงกลมด้วยอัตราเร็ว v_0 ได้ดังรูป 8.6 ขณะเวลาใด ๆ (t) ความเร็วของเงาเท่ากับความเร็วตามแนวระดับของหมุดหาได้จาก

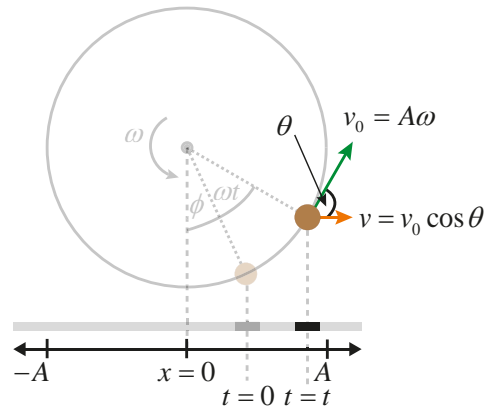
$$v = v_0 \cos \theta$$

จาก $\theta = \omega t + \phi$ และ $v_0 = A\omega$ จะได้

$$v = A\omega \cos(\omega t + \phi) \quad (8.3)$$



รูป 8.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา



รูป 8.6 เปรียบเทียบความเร็วของหมุดกับความเร็วยังเงา

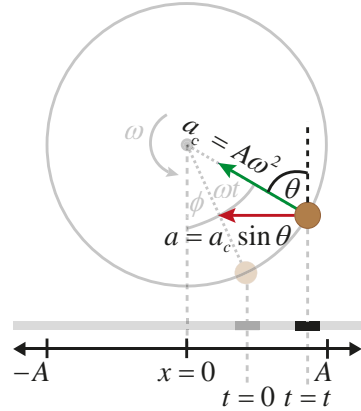
จากสมการ (8.3) ความเร็วกับเวลาของการเคลื่อนที่ของเงามีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันลักษณะแบบโคไซน์ เมื่อ $\phi = 0$ เขียนกราฟความสัมพันธ์ของความเร็วกับเวลาของเงาที่เคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบได้ ดังรูป 8.7

ความเร่งของเงาหาได้จากความเร่งในแนวระดับของหมุด โดยที่ขนาดความเร่งของเงาเท่ากับขนาดความเร่งในแนวระดับของหมุดแต่มีทิศตรงข้ามกับการกระจัด ดังรูป 8.8 ขณะเวลาใด ๆ (t) ความเร่งของเงาหาได้จาก

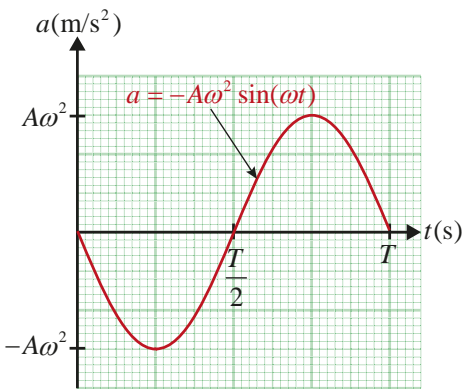
$$a = -a_c \sin \theta$$

จาก $\theta = \omega t + \phi$ และ $a_c = A\omega^2$ จะได้

$$a = -A\omega^2 \sin(\omega t + \phi) \quad (8.4)$$



รูป 8.8 เปรียบเทียบความเร่งของหมุดกับความเร่งของเงา



รูป 8.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา

จากสมการ (8.4) ความเร่งกับเวลาของการเคลื่อนที่ของเงามีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันลักษณะแบบไซน์ เมื่อ $\phi = 0$ เขียนกราฟความสัมพันธ์ของความเร่งกับเวลาของเงาที่เคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบได้ ดังรูป 8.9

สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับการกระจัดของเงาที่เคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายได้ โดยแทนค่าการกระจัดจากสมการ (8.2) ในสมการ (8.4) จะได้สมการความสัมพันธ์ของความเร่งกับการกระจัดตามสมการ

$$a = -\omega^2 x \quad (8.5)$$

เนื่องจากความถี่เชิงมุม ω คงตัว จากสมการ (8.5) จะได้ว่าขนาดของความเร่งแปรผันตรงกับขนาดของการกระจัด แต่มีทิศตรงข้ามกัน สมการ (8.2), (8.3) และ (8.4) จะใช้อธิบายการกระจัด ความเร็ว และความเร่งของวัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายเป็นฟังก์ชันกับเวลา

ตัวอย่าง 8.5 จากตัวอย่าง 8.4 อนุภาคมีการกระจัดเป็น $x = (0.10\text{ m})\sin(\pi t)$ สมการความเร็วของอนุภาคเป็นอย่างไร และที่เวลา $t = 1.0$ วินาที ความเร็วของอนุภาคมีค่าเท่าใด

แนวคิด วัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย มีความเร็วดังสมการ $v = A\omega \cos(\omega t + \phi)$ เมื่อแทนค่าปริมาณต่าง ๆ ในสมการความเร็ว จะหาค่าของ v ซึ่งเป็นความเร็วของอนุภาคที่เวลาต่าง ๆ ได้

วิธีทำ อนุภาคมีแอมพลิจูด $A = 0.10\text{ m}$ ความถี่เชิงมุม $\omega = \pi\text{ s}^{-1}$ และเฟสเริ่มต้น $\phi = 0$ แทนปริมาณเหล่านี้ใน $v = A\omega \cos(\omega t + \phi)$ จะได้

$$\begin{aligned}v &= (0.10\text{ m})(\pi\text{ s}^{-1})\cos(\pi t) \\ &= (0.10\pi)\cos(\pi t)\text{ m s}^{-1}\end{aligned}$$

ที่เวลา $t = 1.0\text{ s}$ จะได้

$$\begin{aligned}v &= (0.10\pi\text{ m s}^{-1})\cos((\pi\text{ s}^{-1})(1.0\text{ s})) \\ &= (0.10\pi\text{ m s}^{-1})\cos(\pi) \\ &= (0.10\pi\text{ m s}^{-1})(-1) \\ &= -0.10\pi\text{ m s}^{-1}\end{aligned}$$

ตอบ สมการความเร็ว $v = (0.10\pi)\cos(\pi t)$ เมตรต่อวินาที และความเร็วที่เวลา $t = 1.0$ วินาทีเท่ากับ -0.1π เมตรต่อวินาที

ตัวอย่าง 8.6 จากตัวอย่าง 8.4 สมการความเร่งของอนุภาค เป็นอย่างไร และที่เวลา $t = 1.0$ วินาที ความเร่งของอนุภาคมีค่าเท่าใด

แนวคิด วัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย มีความเร่งดังสมการ $a = -A\omega^2 \sin(\omega t + \phi)$ เมื่อแทนค่าปริมาณต่าง ๆ ในสมการความเร่ง จะหาค่าของ a ซึ่งเป็นความเร่งของอนุภาคที่เวลาต่าง ๆ ได้

วิธีทำ อนุภาคมีแอมพลิจูด $A = 0.10\text{ m}$ ความถี่เชิงมุม $\omega = \pi\text{ s}^{-1}$ และเฟสเริ่มต้น $\phi = 0$ แทนปริมาณเหล่านี้ใน $a = -A\omega^2 \sin(\omega t + \phi)$ จะได้

$$\begin{aligned}a &= -(0.10\text{ m})(\pi\text{ s}^{-1})^2 \sin(\pi t) \\ &= -(0.10\pi^2)\sin(\pi t)\text{ m s}^{-2}\end{aligned}$$

ที่เวลา $t = 1.0\text{ s}$ จะได้

$$\begin{aligned}a &= -(0.10\pi^2\text{ m s}^{-2})\sin((\pi\text{ s}^{-1})(1.0\text{ s})) \\ &= -(0.10\pi^2\text{ m s}^{-2})\sin(\pi) \\ &= -(0.10\pi^2\text{ m s}^{-2})(0) \\ &= 0.0\end{aligned}$$

ตอบ สมการความเร่ง $a = -(0.10\pi^2)\sin(\pi t)$ เมตรต่อวินาที² และความเร่งเท่ากับศูนย์

ตัวอย่าง 8.7 วัตถุเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย มีความถี่ 2 รอบต่อวินาที ณ ตำแหน่งที่มีการกระจัด 7 เซนติเมตร วัตถุจะมีความเร่งเท่าใด

แนวคิด ความเร่งของวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ณ ตำแหน่งใด ๆ หาได้จากสมการ $a = -\omega^2 x$

วิธีทำ หาความเร่งของวัตถุได้จาก

$$\begin{aligned} a &= -\omega^2 x \\ &= -(2\pi f)^2 x \\ &= -(4)(3.1416)^2 (4 \text{ s}^{-2})(7 \times 10^{-2} \text{ m}) \\ &= -11 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

ตอบ วัตถุมีความเร่งเท่ากับ 11 เมตรต่อวินาที²

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าความเร่งมีความสัมพันธ์กับการกระจัด ทำนองเดียวกันสามารถพิจารณาความเร็วสัมพันธ์กับการกระจัดได้ดังนี้ ความสัมพันธ์ของความเร็วเงากับการกระจัดของเงาที่เคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายหาได้จากการนำค่า $\sin(\omega t + \phi) = \frac{x}{A}$ จากสมการ (8.2) และ $\cos(\omega t + \phi) = \frac{v}{\omega A}$ จากสมการ (8.3) มายกกำลังสองแล้วบวกกัน จะได้

$$\begin{aligned} \sin^2(\omega t + \phi) + \cos^2(\omega t + \phi) &= \frac{x^2}{A^2} + \frac{v^2}{A^2 \omega^2} \\ 1 &= \frac{x^2}{A^2} + \frac{v^2}{A^2 \omega^2} \\ v &= \pm \omega \sqrt{A^2 - x^2} \end{aligned} \quad (8.6)$$

สำหรับเครื่องหมาย \pm ในสมการ (8.6) แสดงถึงทิศความเร็วของวัตถุที่เคลื่อนที่ในหนึ่งมิติ เช่น ที่เวลาเริ่มต้น $t = 0$ วัตถุอยู่ที่ $x = 0$ ความเร็วมีค่าเป็นบวก แสดงว่าวัตถุติดปลายสปริงเคลื่อนที่จากตำแหน่งสมดุลไปทางขวา ในทางกลับกันความเร็วมีค่าเป็นลบแสดงว่าวัตถุเคลื่อนที่ไปทางซ้าย

จากสมการ (8.3) ขนาดความเร็วมีค่าสูงสุดเมื่อ $|\cos(\omega t + \phi)|$ เท่ากับหนึ่ง ดังนั้นจะเรียกว่าขนาดความเร็วสูงสุดหรือ $v_{\max} = A\omega$ พิจารณาค่ายกันกับสมการ (8.4) ที่แสดงขนาดความเร่งจะมีค่าสูงสุดเมื่อ $|\sin(\omega t + \phi)|$ เท่ากับ 1 แทนค่าขนาดความเร่งสูงสุดเป็น $a_{\max} = A\omega^2$ ดังนั้นสมการ (8.3) และ (8.4) เขียนได้เป็น

$$v = v_{\max} \cos(\omega t + \phi) \quad (8.7)$$

$$a = -a_{\max} \sin(\omega t + \phi) \quad (8.8)$$

ตัวอย่าง 8.8 วัตถุหนึ่งเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายรอบตำแหน่งสมดุล โดยมีความถี่เชิงมุม 0.4 เรเดียนต่อวินาที และขนาดการกระจัดสูงสุด 10 เซนติเมตร ขณะที่วัตถุอยู่ห่างจากตำแหน่งสมดุลเป็นระยะทาง 8 เซนติเมตร วัตถุมีอัตราเร็วเท่าใด

แนวคิด อัตราเร็วของวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ณ ตำแหน่งใด ๆ หาได้จากสมการ

$$v = \omega \sqrt{A^2 - x^2}$$

วิธีทำ จากโจทย์ $\omega = 0.4 \text{ s}^{-1}$, $A = 10 \text{ cm}$ และ $x = 8 \text{ cm}$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า} \quad v &= (0.4 \text{ s}^{-1}) \sqrt{(10 \text{ cm})^2 - (8 \text{ cm})^2} \\ &= 2.4 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

ตอบ วัตถุมีอัตราเร็วเท่ากับ 2.4 เซนติเมตรต่อวินาที



คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 8.2

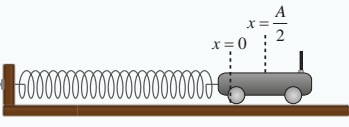
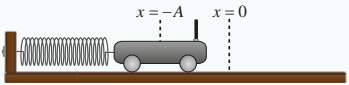
1. กราฟระหว่างการกระจัดกับเวลาของวัตถุชิ้นหนึ่งที่มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ให้ข้อมูลอะไรบ้าง
2. จากกราฟในตัวอย่าง 8.3 จงบรรยายการเคลื่อนที่ของวัตถุ
3. ขณะที่วัตถุสั่นแบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ปริมาณใดที่มีทิศทางตรงข้ามกันเสมอ
4. วัตถุที่สั่นแบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายโดยมีแอมพลิจูดเท่ากับ A วัตถุจะเคลื่อนที่ได้ระยะทางเท่าใดในเวลา 1 คาบ
5. จงอธิบายปริมาณต่าง ๆ ในสมการการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย $x = A \sin(\omega t + \phi)$
6. มุมเฟสและเฟสเริ่มต้น ต่างกันอย่างไร และมีความสำคัญอย่างไร



แบบฝึกหัด 8.2

1. วัตถุเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย มีแอมพลิจูด 30 เซนติเมตร มีคาบการเคลื่อนที่ 4 วินาที อัตราเร็วสูงสุดของการเคลื่อนที่มีค่าเท่าใด
2. วัตถุหนึ่งเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายด้วยความถี่ 30 รอบต่อวินาที มีขนาดการกระจัดสูงสุด 20 เซนติเมตร ขนาดความเร่งสูงสุดของวัตถุนี้มีค่าเท่าใด

3. จงเขียนสมการการกระจัดที่ขึ้นกับเวลาของวัตถุติดปลายสปริงที่เคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย มีตำแหน่งเริ่มต้นต่างกันในตาราง กำหนดให้ ความถี่เชิงมุมเท่ากับ ω แอมพลิจูดเท่ากับ A

รูปแสดงตำแหน่งเริ่มต้นที่ $t = 0$	เฟสเริ่มต้น (ϕ)	สมการการกระจัด
ก. 		
ข. 		

4. วัตถุเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ด้วยความถี่ 5 รอบต่อวินาที
- เมื่อเวลาผ่านไป 2 วินาที วัตถุอยู่ในมุมเฟสต่างจากเดิมเท่าใด
 - เมื่อวัตถุอยู่ในมุมเฟสต่างจากเดิม $\frac{21\pi}{2}$ เรเดียน วัตถุเคลื่อนที่ได้กี่รอบ
 - วัตถุใช้เวลาเท่าใด จึงจะอยู่ในมุมเฟสต่างไปจากเดิม 4π เรเดียน
5. วัตถุหนึ่งเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายรอบจุดสมดุล O โดยมีอัตราเร็วสูงสุด 5.0 เซนติเมตรต่อวินาที และมีคาบการสั่นเท่ากับ 4π วินาที ขณะที่วัตถุมีอัตราเร็ว 3.0 เซนติเมตรต่อวินาที วัตถุอยู่ห่างจากจุดสมดุล O เป็นระยะกี่เซนติเมตร

8.3 แรงกับการสั่นของมวลติดปลายสปริงและลูกตุ้มอย่างง่าย

เราทราบแล้วว่า การสั่น หรือการแกว่งกวัด เป็นการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาผ่านตำแหน่งสมดุล ในหัวข้อนี้จะได้ศึกษาการสั่นแบบที่ง่ายที่สุดที่เรียกว่า การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ได้แก่ การสั่นของวัตถุติดปลายสปริง และการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งสมดุลจะมีแรงดึงวัตถุกลับมายังตำแหน่งสมดุล ซึ่งเป็นแรงที่ทำให้วัตถุเคลื่อนที่กลับไปมาซ้ำทางเดิมเรียกแรงนี้ว่า **แรงดึงกลับ (restoring force)** สัมพันธ์กับปริมาณอื่น ๆ ของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายอย่างไร จะได้ศึกษาในหัวข้อนี้

8.3.1 การสั่นของมวลติดปลายสปริง

การสั่นของมวลติดปลายสปริงเป็นตัวอย่างหนึ่งของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ในหัวข้อนี้จะพิจารณาแรงที่กระทำต่อวัตถุติดปลายสปริง และศึกษาปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย จากกิจกรรม 8.1