



# คู่มือประกอบสื่อการสอนวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์

ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย

## วิชาชีววิทยา

เรื่อง

การแปรหัสพันธุกรรม

โดย

อาจารย์ ดร.ธนะกาญจน์ มัญชุพาณี

พุทธศักราช 2554



## กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์นันทนา อังกินันท์

รองศาสตราจารย์สุมิตรา คงชื่นสิน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัชรา ลิ้มปะนะเวช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ต่อศักดิ์ สีลานันท์

นางปริชญ์นุช กลิ่นรัตน์

นางจุฬนา บางยี่ขัน

## สถานที่ให้ความอนุเคราะห์ภาพ/ ข้อมูล

ภาควิชาชีวเคมี และภาควิชาพฤกษศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## คำชี้แจง

การแปลรหัสพันธุกรรม เป็นตอนหนึ่งของสื่อประกอบการสอนเรื่อง ยีนและโครโมโซม ซึ่งมีสื่อทั้งหมด 10 ตอน คือ

1. ยีนและโครโมโซม
2. โครงสร้างของดีเอ็นเอ
3. โครงสร้างของโครโมโซม
4. ความสัมพันธ์ระหว่างยีน ดีเอ็นเอ โครโมโซม และจีโนม
5. การจำลองตัวของดีเอ็นเอ
6. การถอดรหัสพันธุกรรม
7. การแปลรหัสพันธุกรรม
8. มิวเทชันระดับยีน
9. มิวเทชันระดับโครโมโซม
10. โรคทางพันธุกรรม

คู่มือประกอบการสอนเรื่อง การแปลรหัสพันธุกรรม นี้ จัดทำขึ้นเพื่อช่วยให้ ผู้สอนเข้าใจ จุดประสงค์และขอบเขตของเนื้อหาของสื่อประกอบการสอนที่ผลิตขึ้น อีกทั้งเป็นแนวทางให้ผู้สอนนำสื่อประกอบการสอนไปใช้ได้อย่างเหมาะสม รวมถึงช่วยให้ผู้เรียนเข้าใจและกระตุ้นความสนใจเนื้อหา ของบทเรียน นอกจากนี้ ยังสร้างความเข้าใจที่ถูกต้องเกี่ยวกับศัพท์ทางวิชาการที่ควรทราบ และเปิดโอกาสให้ผู้เรียนได้บูรณาการความรู้ที่ได้รับ โดยการอภิปราย ร่วมกัน ซึ่งหากบรรลุวัตถุประสงค์ที่กล่าวมา ข้างต้นแล้ว จะทำให้การจัดการเรียนการสอนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

อาจารย์ ดร.

อาจารย์ ดร.รัชนีกร ธรรมโชติ

ผู้ตรวจคู่มือ

ธนะกาญจน์ มัญชุพาศน์

ผู้จัดทำคู่มือ



## สารบัญ

|                                          | หน้า |
|------------------------------------------|------|
| จุดประสงค์                               | 5    |
| ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง                  | 5    |
| เนื้อหา                                  | 6    |
| แนวทางในการจัดการเรียนรู้                | 21   |
| ภาคผนวก                                  | 25   |
| ก. คำอธิบายศัพท์                         |      |
| ข. แหล่งเรียนรู้เพิ่มเติม                |      |
| รายชื่อสื่อการสอนวิชาชีพวิชาจำนวน 92 ตอน | 27   |



## จุดประสงค์

เพื่อให้ผู้เรียนสามารถอธิบาย

1. การค้นพบรหัสพันธุกรรม
2. การใช้ตารางโคดอน
3. องค์ประกอบภายในเซลล์ที่เกี่ยวข้องกับการแปลรหัส
4. ขั้นตอนการแปลรหัสพันธุกรรม

## ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง

เมื่อผู้เรียนได้ดูสื่อแล้วสามารถ

1. อธิบายถึงเหตุผลที่เซลล์เลือกใช้โปรตีนเป็นโมเลกุลชนิดหลักในการทำหน้าที่ต่างๆ ในเซลล์
2. บอกความหมายของรหัสพันธุกรรม และความหมายของ codon
3. อธิบายเหตุผลที่เซลล์เลือกเบสจำนวนสามเบสเป็นรหัสพันธุกรรม
4. อธิบายกฎของการแปลรหัสพันธุกรรม และบอกข้อดีของการมีกฎที่เคร่งครัดเช่นนั้น
5. อธิบายชนิดและหน้าที่ของ RNA ที่เกี่ยวข้องกับการแปลรหัสพันธุกรรม
6. ระบุชนิดของโมเลกุลที่ใช้ในกระบวนการแปลรหัสการพอสังเขป
7. อธิบายความสำคัญของ codon และ anticodon ในกระบวนการแปลรหัส
8. ระบุชื่อเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการสร้างพันธะเพปไทด์
9. เมื่อกำหนดรหัสเบสบนโมเลกุล mRNA ตั้งต้นที่มี start codon และ stop codon แล้วสามารถระบุลำดับกรดอะมิโนของสายพอลิเพปไทด์ที่ได้จากการแปลรหัส โดยเรียงจากทิศของปลาย amino (N- terminal) ไปปลาย carboxyl (C- terminal)



## เนื้อหา

### เหตุผลที่เซลล์สร้างชีวโมเลกุลชนิดโปรตีน

เซลล์มีชีวโมเลกุลชนิดหลักที่มีปริมาณมากที่สุดอยู่สามชนิดคือ deoxyribonucleic acid (DNA) Ribonucleic acid (RNA) และโปรตีน (protein)

โมเลกุล DNA และ RNA มีหน่วยย่อยที่เป็นเบสเพียงสี่ชนิดจึงมีความหลากหลายทางเคมีและทางโครงสร้างที่ต่ำ จึงไม่เหมาะในการเป็นตัวทำหน้าที่ต่างๆ ที่มีมากมายในเซลล์

โปรตีนเป็นชีวโมเลกุลที่มีหน่วยย่อยเป็นกรดอะมิโนถึง 20 ชนิดจึงมีความหลากหลายทางเคมีสูง ประกอบกับโปรตีนสามารถเกิดโครงสร้างของโมเลกุลได้หลายระดับ ตั้งแต่โครงสร้างเรียบง่าย ไปจนถึงโครงสร้างที่ซับซ้อน นอกจากนี้โปรตีนยังสามารถไปรวมตัวเกิดสารเชิงซ้อนกับโมเลกุลชนิดอื่นๆ ได้อีก เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน แร่ธาตุ และสารอนินทรีย์ ด้วยความหลากหลายทางโครงสร้างและทางเคมีของโปรตีนที่มีอยู่อย่างมหาศาล ทำให้โปรตีนถูกคัดเลือกในกระบวนการวิวัฒนาการของชีวิต มาเป็นทำงานหลักในเซลล์ที่มีอยู่อย่างมากมายและซับซ้อน ตั้งแต่ เป็นตัวโครงสร้าง ตัวลำเลียงสาร ตัวควบคุมการทำงาน เป็นฮอร์โมน ไปจนถึงเป็นตัวเร่งชีวปฏิกิริยาหรือเอนไซม์นั่นเอง (ตารางที่ 1 และ รูปที่ 1)

**ตารางที่ 1** ความสอดคล้องระหว่างหน้าที่การทำงานและสมบัติทางกายภาพและเคมีของ DNA RNA และโปรตีน

| โมเลกุล     | หน้าที่การทำงาน                                                                  | สมบัติทางกายภาพและเคมี                                   |                     |                          |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------|
|             |                                                                                  | หน่วยย่อยทางเคมีในโมเลกุล                                | ความหลากหลายทางเคมี | ความหลากหลายทางโครงสร้าง |
| DNA และ RNA | บรรจุข้อมูลพันธุกรรมสำหรับใช้ในเซลล์                                             | เบส 4 ชนิด<br>(DNA มี A, C, G, T)<br>(RNA มี A, C, G, U) | ต่ำ                 | ไม่หลากหลาย              |
| โปรตีน      | เป็นโครงสร้างและเป็นตัวทำงานหลัก ในกระบวนการต่าง ๆ ของเซลล์ที่หลากหลายและซับซ้อน | กรดอะมิโน 20 ชนิด                                        | สูง                 | หลากหลายและซับซ้อน       |



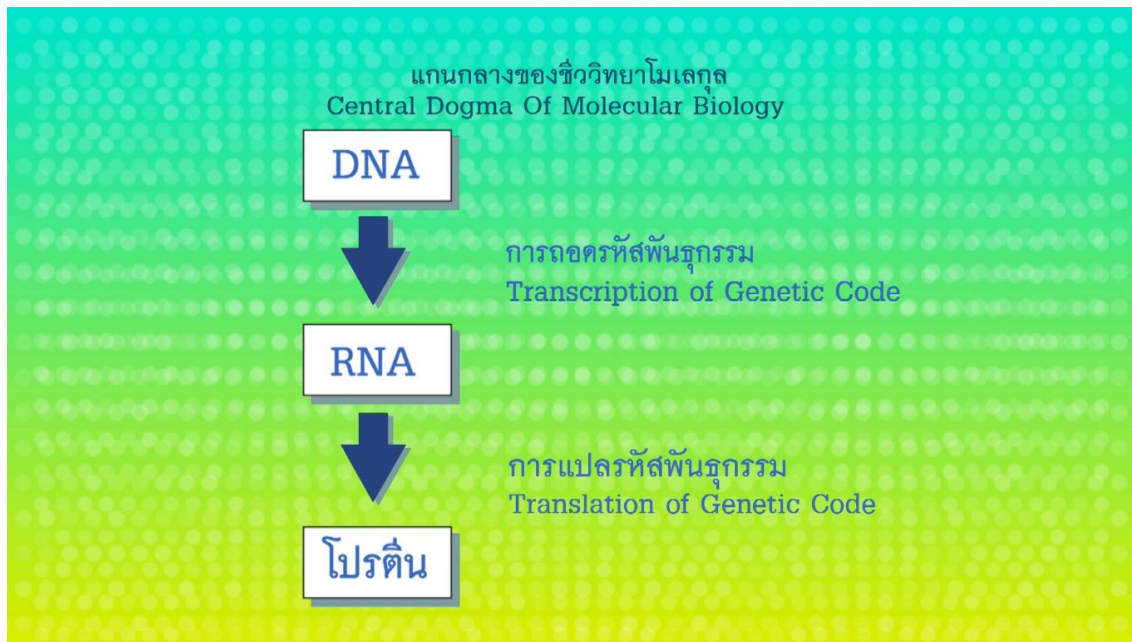
รูปที่ 1 ความหลากหลายของโครงสร้างและหน้าที่การทำงานของโปรตีน

### แกนกลางของชีววิทยาโมเลกุล (central dogma of molecular biology)

ในบทเรียนก่อนหน้านี้ เราทราบแล้วว่าสิ่งมีชีวิตมีการแสดงออกของข้อมูลพันธุกรรมโดยผ่านแกนกลางของชีวโมเลกุล (รูปที่ 2) ซึ่งมีสองขั้นตอนคือ

การถอดรหัสพันธุกรรมจาก DNA ไปสร้างเป็น RNA เรียกว่า transcription of genetic code  
การแปลรหัสพันธุกรรมจาก RNA ไปสร้างเป็นโปรตีน เรียกว่า translation of genetic code

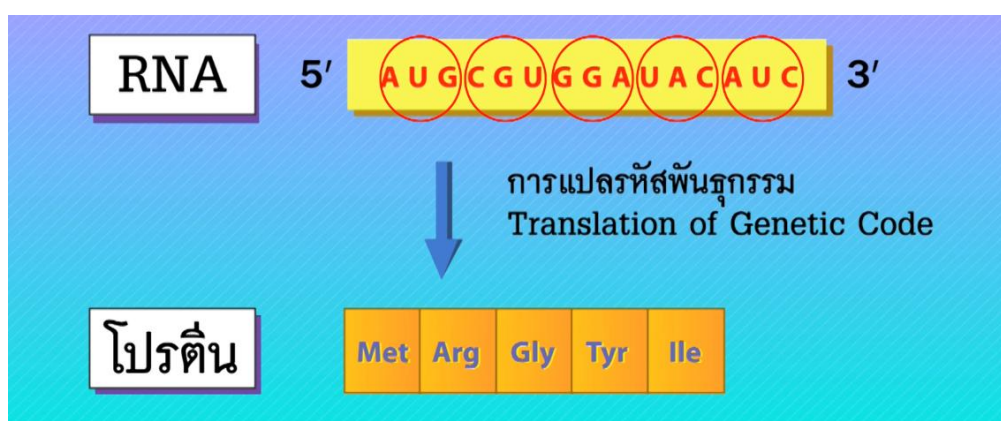
ในบทเรียนนี้จะกล่าวถึงกระบวนการแปลรหัสพันธุกรรม



รูปที่ 2 การแสดงออกของข้อมูลพันธุกรรมผ่านแกนกลางของชีววิทยาโมเลกุล

### รหัสพันธุกรรม (genetic code)

คือ รหัสเบสบน DNA หรือ RNA (ส่วนใหญ่จะนิยมใช้กับบริบทของ RNA) ที่กำหนดลำดับกรดอะมิโนบนโปรตีน ในธรรมชาติรหัสเบสสามตัวของ RNA ที่ติดกันจะถูกแปลรหัสเป็นกรดอะมิโน 1 ตัว เช่นในรูปที่ 3 RNA ที่มีลำดับเบส 15 ตัวเมื่อถูกแปลรหัสจะได้กรดอะมิโน 5 ตัว



รูปที่ 3 ตัวอย่างการแปลรหัสเบสบน RNA ไปเป็นลำดับกรดอะมิโนในโปรตีน



รหัสเบสสามตัวที่ติดกันบน RNA นี้เรียกว่า หนึ่งรหัสพันธุกรรมหรือหนึ่งโคดอน (codon) ซึ่งจะแปลรหัสให้กรดอะมิโนหนึ่งตัวเท่านั้น เหตุผลที่เซลล์เลือกเบสจำนวนสามตัวเป็นรหัสพันธุกรรมอธิบายได้ดังรูปที่ 4

| จำนวนเบสในแต่ละ Codon | รูปแบบรหัสที่มีได้                                                                   | จำนวนรหัส |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 เบส                 | A , G , U , C                                                                        | 4         |
| 2 เบส                 | AA , AG , AU , AC      GA , GG , GU , GC<br>UA , UG , UU , UC      CA , CG , CU , CC | 16        |
| 3 เบส                 | AAA .....CCC<br>.....<br>.....                                                       | 64        |
| 4 เบส                 | AAAA .....CCCC<br>.....<br>.....                                                     | 256       |

รูปที่ 4 จำนวนรหัสพันธุกรรมที่มีได้จากการใช้เบสจำนวนต่าง ๆ เป็นรหัส

เซลล์มีกรดอะมิโนอยู่ทั้งหมด 20 ชนิดสำหรับนำไปสร้างเป็นโมเลกุลโปรตีน ดังนั้นเซลล์จึงต้องการรหัสพันธุกรรมอย่างน้อย 20 รหัสเพื่อใช้ในการแปลเป็นกรดอะมิโนทั้ง 20 ชนิด

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า หากใช้เบสเพียงหนึ่งเบส หรือสองเบสเป็นรหัส ก็จะได้รูปแบบรหัสพันธุกรรมเพียง 4 และ 16 รหัสตามลำดับ ซึ่งไม่เพียงพอกับจำนวนกรดอะมิโนที่มีอยู่ 20 ชนิด

หากใช้เบสสามเบสและสี่เบสเป็นรหัส ก็จะได้รหัสพันธุกรรมถึง 64 และ 256 รหัสตามลำดับ ซึ่งเพียงพอกับจำนวนกรดอะมิโนที่มีอยู่ 20 ชนิด

ในธรรมชาติเซลล์เลือกเบสสามเบสเป็นรหัสพันธุกรรม เพราะมี 64 รหัสก็เพียงพอในการกำหนดชนิดกรดอะมิโนทั้ง 20 ชนิดแล้ว เซลล์ไม่เลือกสี่เบสเป็นรหัสเพราะมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น เกิดผลเสียคือมีความยุ่งยาก ซับซ้อนในการแปลรหัส และสิ้นเปลืองพลังงาน



เมื่อหนึ่งรหัสพันธุกรรมมีสามเบส จะได้รูปแบบของรหัสที่เป็นไปได้ทั้งหมด 64 รหัสพันธุกรรม (codon) ดังรูปที่ 5 ดังนี้

### รหัสพันธุกรรมทั้ง 64 codon

| เบสตัวที่สอง      |   |                                                                |                                                                  |                                                                                  |                                                              |
|-------------------|---|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
|                   |   | U                                                              | C                                                                | A                                                                                | G                                                            |
| เบส<br>ตัว<br>แรก | U | UUU Phenylalanine<br>UUC alanine<br>UUG Leucine<br>UUA Leucine | UCU Serine<br>UCC Serine<br>UCA Serine<br>UCG Serine             | UAU Tyrosine<br>UAC Tyrosine<br>UAA Stop<br>UAG Stop                             | UGU Cysteine<br>UGC Cysteine<br>UGA Stop<br>UGG Tryptophan   |
|                   |   | CUU Leucine<br>CUC Leucine<br>CUA Leucine<br>CUG Leucine       | CCU Proline<br>CCC Proline<br>CCA Proline<br>CCG Proline         | CAU Histidine<br>CAC Histidine<br>CAA Glutamine<br>CAG Glutamine                 | CGU Arginine<br>CGC Arginine<br>CGA Arginine<br>CGG Arginine |
|                   | A | AUU Isoleucine<br>AUA Isoleucine<br>AUG Methionine             | ACU Threonine<br>ACC Threonine<br>ACA Threonine<br>ACG Threonine | AAU Asparagine<br>AAC Asparagine<br>AAA Lysine<br>AAG Lysine                     | AGU Serine<br>AGC Serine<br>AGA Arginine<br>AGG Arginine     |
|                   |   | GUU Valine<br>GUC Valine<br>GUA Valine<br>GUG Valine           | GCU Alanine<br>GCC Alanine<br>GCA Alanine<br>GCG Alanine         | GAU Aspartic acid<br>GAC Aspartic acid<br>GAA Glutamic acid<br>GAG Glutamic acid | GGU Glycine<br>GGC Glycine<br>GGA Glycine<br>GGG Glycine     |
|                   | G |                                                                |                                                                  |                                                                                  |                                                              |
|                   |   |                                                                |                                                                  |                                                                                  |                                                              |
|                   |   |                                                                |                                                                  |                                                                                  |                                                              |
|                   |   |                                                                |                                                                  |                                                                                  |                                                              |
|                   | C |                                                                |                                                                  |                                                                                  |                                                              |
|                   |   |                                                                |                                                                  |                                                                                  |                                                              |
|                   |   |                                                                |                                                                  |                                                                                  |                                                              |
|                   |   |                                                                |                                                                  |                                                                                  |                                                              |
|                   | A |                                                                |                                                                  |                                                                                  |                                                              |
|                   |   |                                                                |                                                                  |                                                                                  |                                                              |
|                   |   |                                                                |                                                                  |                                                                                  |                                                              |
|                   |   |                                                                |                                                                  |                                                                                  |                                                              |
|                   | G |                                                                |                                                                  |                                                                                  |                                                              |
|                   |   |                                                                |                                                                  |                                                                                  |                                                              |
|                   |   |                                                                |                                                                  |                                                                                  |                                                              |
|                   |   |                                                                |                                                                  |                                                                                  |                                                              |

รูปที่ 5 รหัสพันธุกรรม 64 codon

(ที่มา: [http://andersonlab.qb3.berkeley.edu/Tutorials/Basic\\_Molecular\\_Biology.htm](http://andersonlab.qb3.berkeley.edu/Tutorials/Basic_Molecular_Biology.htm))



## กฎการอ่านรหัสพันธุกรรม

1. รหัสจะถูกอ่านจากทิศ 5' ไป 3' เสมอ
2. หนึ่งรหัสพันธุกรรมเรียกว่า 1 codon ประกอบด้วย 3 เบส และแปลรหัสได้เป็นกรดอะมิโนเพียง 1 ชนิดเท่านั้น ยกเว้น stop codon ที่ไม่ใหกรดอะมิโนเลย
3. การแปลรหัสจะเริ่มที่ start codon ที่มีรหัสเป็น AUG ซึ่งใหกรดอะมิโนชนิด methionine เสมอ
4. การแปลรหัสจะสิ้นสุดที่ stop codon ที่มีรหัสสามชนิดคือ UAA, UAG หรือ UGA ซึ่งทั้งสามชนิดนี้ไม่ใหกรดอะมิโนชนิดใดเลย
5. กรดอะมิโนชนิดเดียวกันอาจมี codon ได้มากกว่าหนึ่งแบบ เช่น leucine มี codon ถึง 4 แบบ คือ CUU, CUC, CUA, CUG (ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเซลล์มี 64 codon สำหรับกรดอะมิโน 20 ชนิด ดังนั้นกรดอะมิโน 1 ชนิดจึงอาจมี codon ได้มากกว่า 1 codon)
6. รหัสพันธุกรรมทั้ง 64 codon นี้เหมือนกันในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตเกือบทุกชนิด นั่นคือรหัสมีความเป็นสากล แต่มีข้อยกเว้นในไมโทคอนเดรียและคลอโรพลาสต์ซึ่งมีรหัสพันธุกรรมบางรหัสที่เป็นของตัวเองซึ่งแตกต่างจากรหัสสากลนี้
7. การอ่านรหัสพันธุกรรมบน RNA จะอ่านเรียงลำดับไปที่ละ codon คือทีละสามเบส และอ่านจากทิศ 5' ไป 3' เสมอ จะไม่มีการอ่านย้อนกลับ อ่านซ้ำ หรือกระโดดข้ามเบสเด็ดขาด อุปมาเหมือนการอ่านหนังสือก็ต้องอ่านเรียงตามตัวอักษรและอ่านไปในทิศทางเดียวกันจึงจะได้ความหมายที่ถูกต้อง

เซลล์มีกฎการอ่านและแปลรหัสที่ชัดเจน ไม่คลุมเครือ และมีความเคร่งครัด เพื่อที่จะสร้างโปรตีนได้ถูกต้อง ทั้งนี้เป็นการป้องกันการแปลรหัสที่ผิดพลาดซึ่งจะทำให้เกิดโปรตีนที่ผิดปกติและอาจทำให้เซลล์ตายได้ ก่อนที่จะกล่าวถึงกระบวนการแปลรหัสพันธุกรรมบน RNA เราจำเป็นต้องทราบชนิดและหน้าที่ของ RNA ก่อน

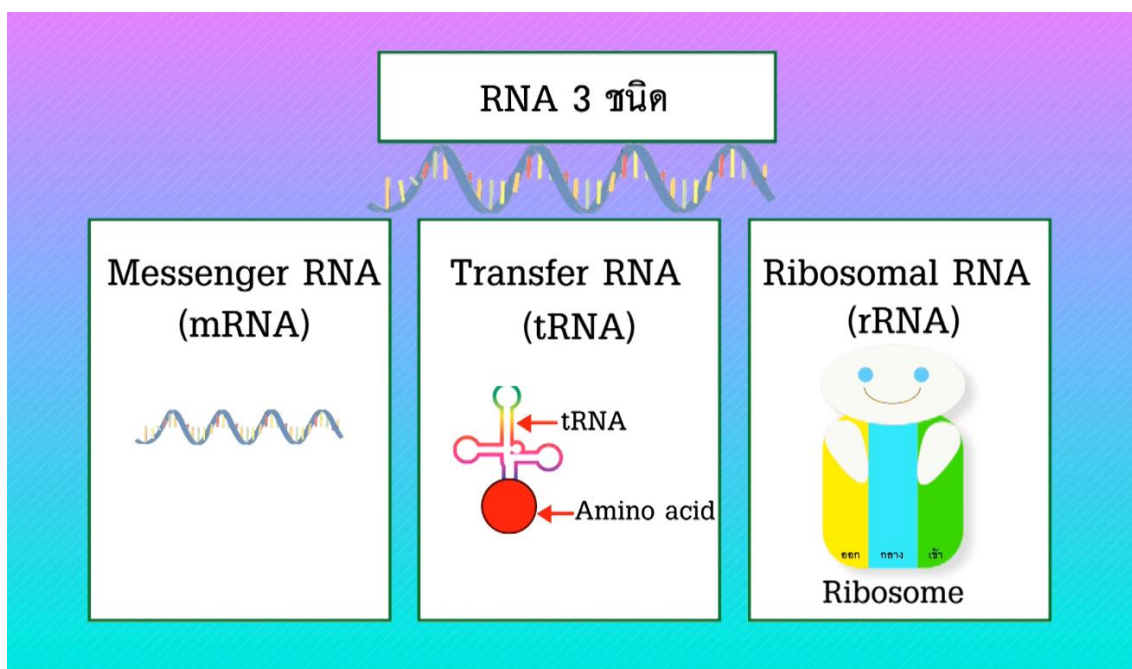


## ชนิดและหน้าที่ของ RNA ที่เกี่ยวข้องกับการแปลรหัสพันธุกรรม

RNA ที่เกี่ยวข้องกับการแปลรหัสมีสามชนิด (รูปที่ 6) คือ

1. messenger RNA (mRNA) ทำหน้าที่นำข้อมูลพันธุกรรมจาก DNA เพื่อไปสร้างโปรตีน
2. transfer RNA (tRNA) ทำหน้าที่ขนส่งกรดอะมิโน ซึ่งเป็นหน่วยย่อยในการสร้างโปรตีน
3. ribosomal RNA (rRNA) โมเลกุลชนิดนี้จะไปรวมตัวกับโปรตีนเกิดเป็นสารเชิงซ้อนโมเลกุลขนาดใหญ่ที่เรียกว่า ไรโบโซม ซึ่งมีหน้าที่เป็นเสมือนโรงงานในการสร้างโปรตีน

กระบวนการสร้างโปรตีนนั้นจำเป็นต้องใช้ RNA ทั้งสามชนิด แต่โมเลกุล mRNA เท่านั้นที่เป็นบรรจุรหัสพันธุกรรม (genetic code) ที่จะนำไปสร้างโปรตีน โมเลกุลอีกสองชนิดคือ tRNA และ rRNA ไม่ได้บรรจุข้อมูลพันธุกรรม แต่เป็นเสมือนเครื่องมือและโรงงานในการสร้างโปรตีนตามลำดับ



รูปที่ 6 RNA สามชนิดที่ทำหน้าที่ในการแปลรหัส



## การแปลรหัสพันธุกรรม (Translation of Genetic Code)

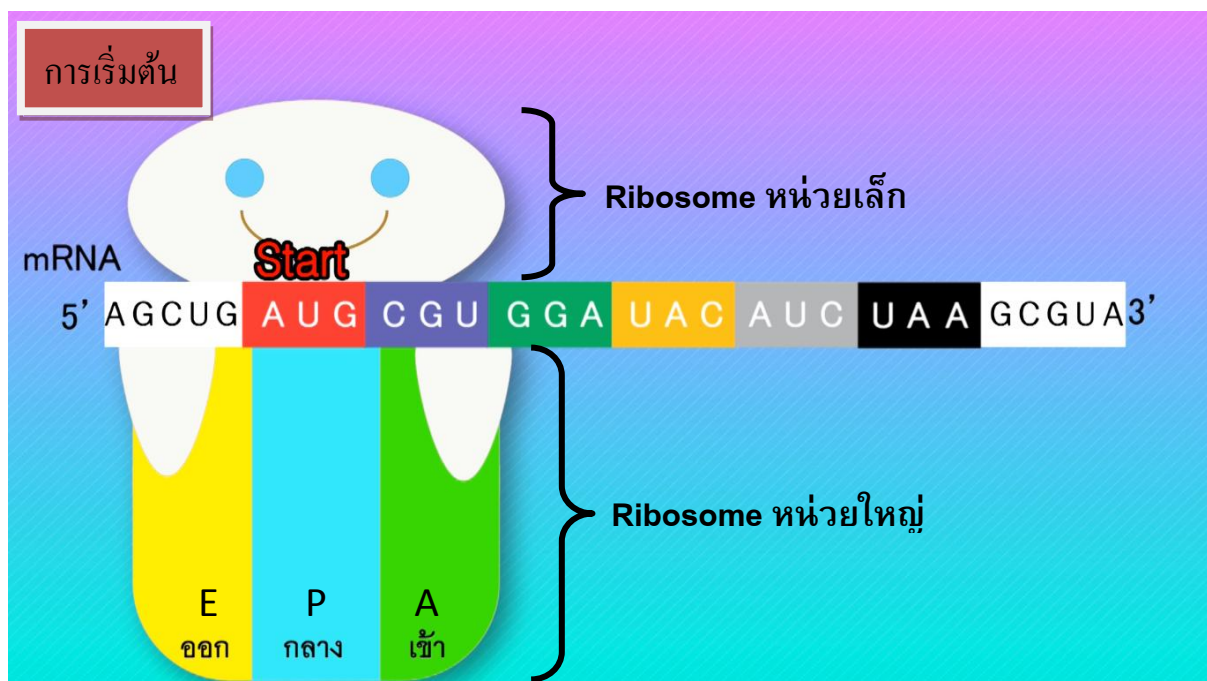
มีความหมายคือ กระบวนการสร้างโมเลกุลโปรตีนโดยใช้โมเลกุล RNA สายเดี่ยวเพียงสายเดียวเท่านั้นเป็นแม่แบบ (template) โดยโปรตีนที่ได้จะมีลำดับของกรดอะมิโนตรงตามรหัสในตารางการแปลรหัสพันธุกรรมทั้ง 64 codon ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยกระบวนการแปลรหัสมีดังนี้

### กระบวนการแปลรหัสพันธุกรรม

#### การเริ่มต้นของการแปลรหัสพันธุกรรม (initiation of translation)

เกิดที่ start codon ของ messenger RNA (mRNA) เสมอ ซึ่งมีลำดับเบส 5' AUG 3' ในการเริ่มต้นของการแปลรหัสนี้ ไรโบโซมซึ่งเป็นเสมือนโรงงานในการสร้างโปรตีนเข้ามาจับกับ mRNA ตรง start codon ดังรูปที่ 7

ไรโบโซมนี้เป็นสารเชิงซ้อนขนาดใหญ่ของ ribosomal RNA (rRNA) และโปรตีน ไรโบโซมมีสองหน่วยย่อย คือหน่วยย่อยเล็ก (ส่วนหัว) และหน่วยย่อยใหญ่ (ส่วนตัว) โดยไรโบโซมส่วนหัวจะมาจับ start codon (AUG) ก่อน หลังจากนั้นไรโบโซมส่วนตัวจะมาประกอบกับส่วนหัว จนเกิดเป็นไรโบโซมที่ครบทั้งสองส่วน ส่วนตัวของไรโบโซมจะมีสามช่องคือ ช่องทางเข้า (ช่อง A) ช่องตรงกลาง (ช่อง P) และช่องทางออก (ช่อง E)



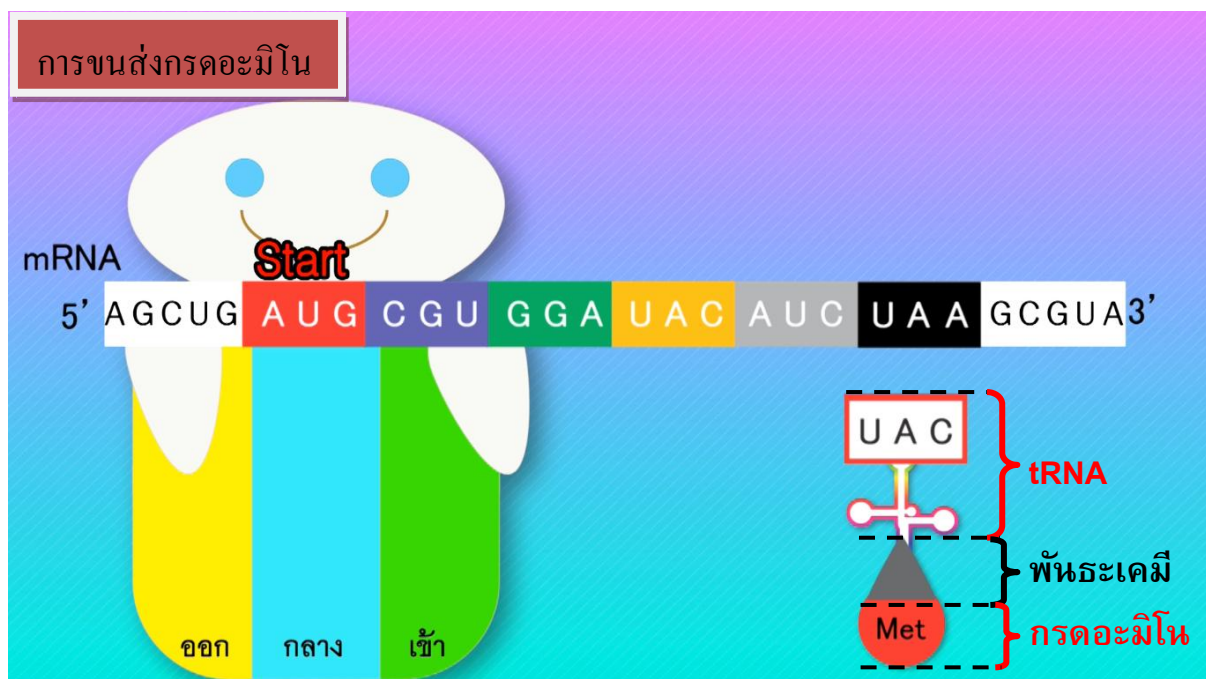
รูปที่ 7 การเริ่มต้นแปลรหัส



หนึ่งในเซลล์สิ่งมีชีวิต start codon จะไม่อยู่ด้านปลายสุดทางทิศ 5' ของโมเลกุล RNA แต่ start codon มักจะอยู่ถัดเข้ามาภายในชิ้นของ RNA จาก ตัวอย่างในรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าปลาย 5' ของโมเลกุล mRNA มีลำดับเบส 5' -AGCUGAUG... ซึ่ง start codon (AUG) นี้อยู่ถัดเข้ามาจากปลาย 5' ของโมเลกุล mRNA

### การขนส่งกรดอะมิโนโดยโมเลกุล transfer RNA

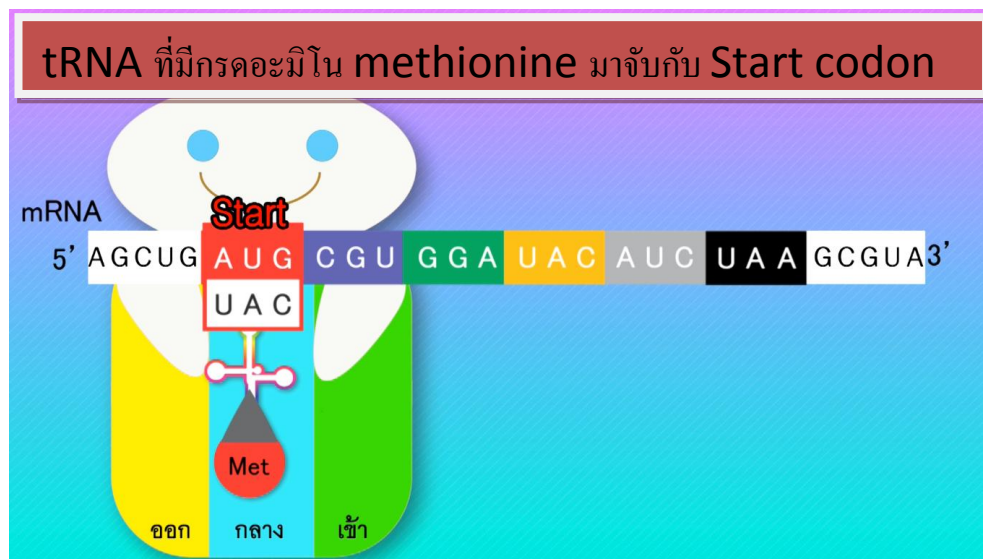
โมเลกุลที่เป็นตัวขนส่งกรดอะมิโนคือ transfer RNA (tRNA) โดยกรดอะมิโนจะเชื่อมต่อกับ tRNA ด้วยพันธะเคมี โดยลำดับเบสบน tRNA จะเป็นตัวกำหนดชนิดของกรดอะมิโน (รูปที่ 8)



รูปที่ 8 tRNA ทำหน้าที่ขนส่งกรดอะมิโน

### การขนส่งกรดอะมิโนตัวแรกมายัง ribosome

tRNA ที่มีกรดอะมิโน methionine (Met) จะเป็น tRNA ตัวแรกที่มาจับกับ start codon (AUG) ของ mRNA โดยการจับเกิดขึ้นตรงช่องกลางของไรโบโซม (รูปที่ 9)



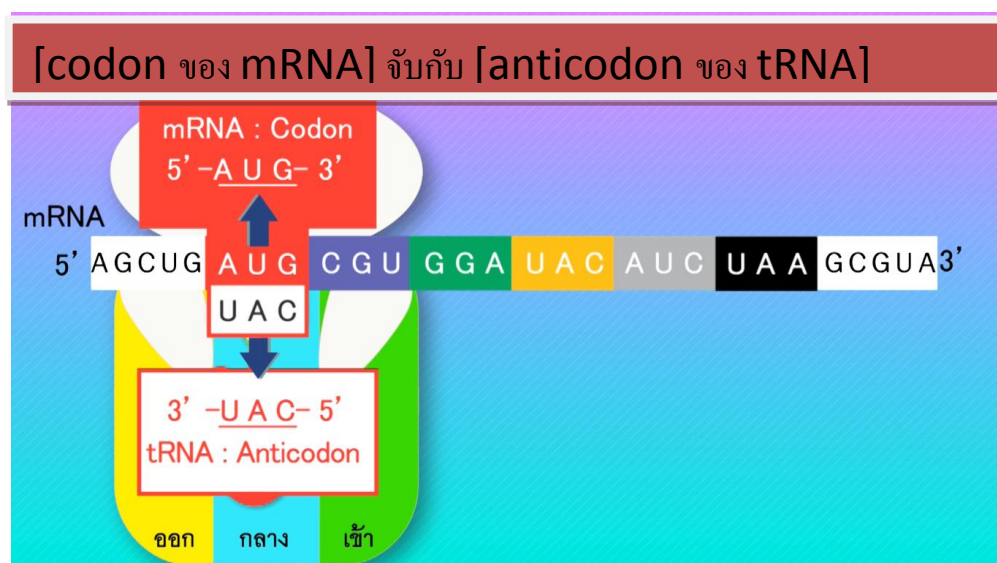
รูปที่ 9 การขนส่งกรดอะมิโนตัวแรกให้ไรโบโซม

การจับกันแบบจำเพาะระหว่าง mRNA ที่ start codon และ tRNA เกิดขึ้นได้เพราะโมเลกุลทั้งสองชนิดมีเบสคู่สม (complementary base) โดย

รหัสเบสบน mRNA เรียกว่า codon (ตัวอย่างในรูปที่ 10 คือ 5' AUG 3' )

รหัสเบสคู่สมบน tRNA เรียกว่า anticodon (ตัวอย่างในรูปที่ 10 คือ 3' UAC 5' )

ทั้งนี้ codon กับ anticodon จะเป็นเบสคู่สมกันและมีทิศกลับกันเสมอ ดังนั้นหัวใจในการแปลรหัสให้ถูกต้องคือการจับกันระหว่าง codon ของ mRNA และ anticodon ของ tRNA เมื่อเป็นดังนี้ tRNA นำกรดอะมิโนชนิดที่ถูกต้องมายังไรโบโซมได้เพราะ tRNA ที่มีกรดอะมิโนตรงตามกฎการแปลรหัสพันธุกรรมนั้นมี anticodon ซึ่งเป็นเบสคู่สมกับ codon บน mRNA นั้นเอง



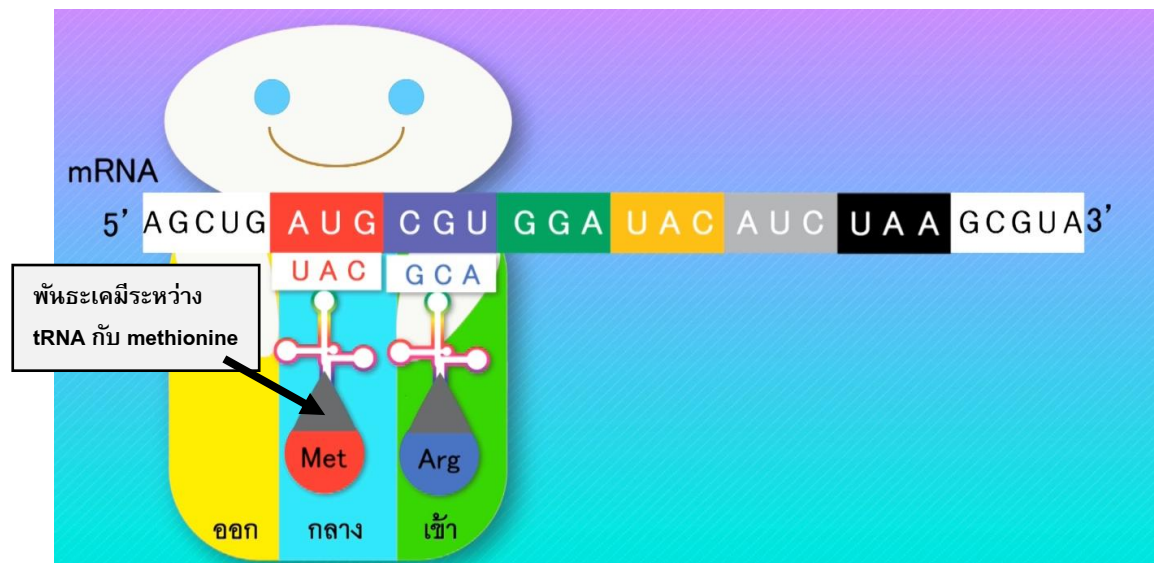
รูปที่ 10 codon และ anticodon



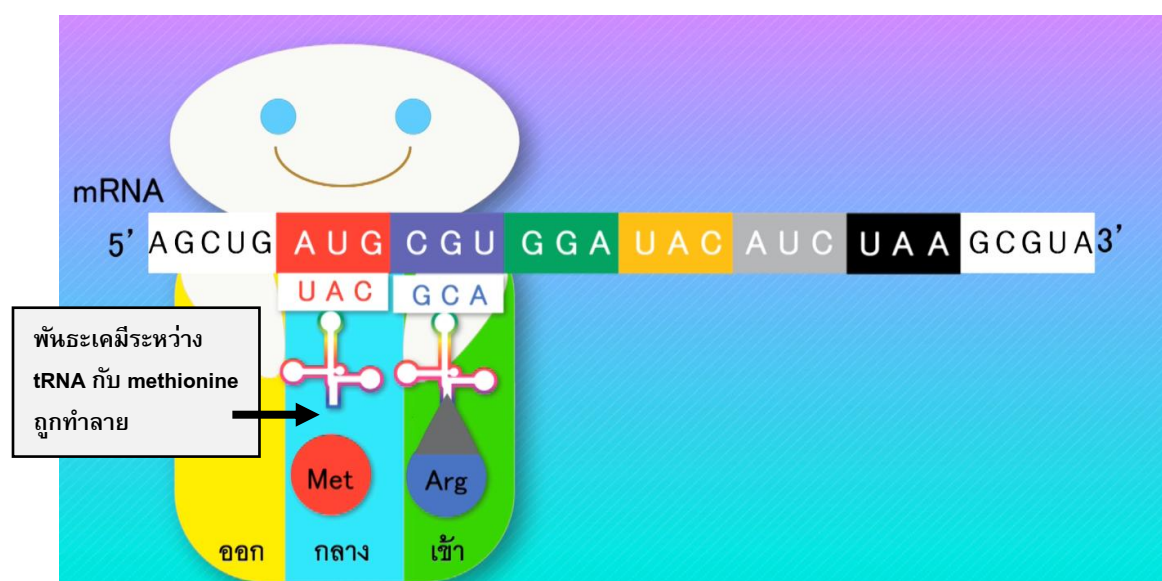
หมายเหตุ เบสคู่สม (complementary base) ระหว่าง mRNA (codon) กับ tRNA (anticodon)  
คือ A-U, U-A, C-G และ G-C

### การขนส่งกรดอะมิโนตัวที่สองให้กับไรโบโซม

จากตัวอย่างในรูปที่ 11 tRNA ตัวใหม่ที่มี anticodon (3' GCA 5') ที่มีเบสคู่สมกับ codon ที่สอง (5' CGU 3') พากรดอะมิโน arginine (Arg) มาที่ไรโบโซมตรงทางเข้า โดย tRNA ตัวที่สอง ใช้ anticodon จับกับ codon หลังจากนั้นไรโบโซมทำลายพันธะเคมีระหว่าง tRNA ตัวแรกกับ methionine (รูปที่ 12)



รูปที่ 11 การขนส่งกรดอะมิโนตัวที่สองให้ไรโบโซม



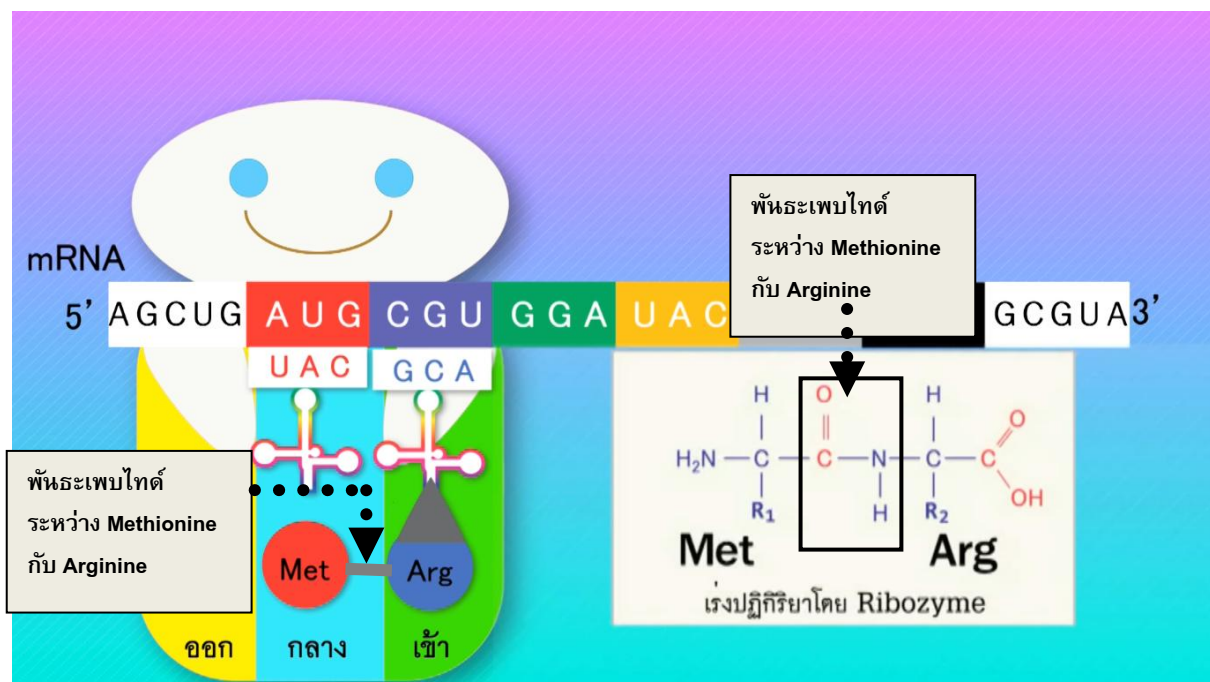
รูปที่ 12 การทำลายพันธะเคมีระหว่าง tRNA กับกรดอะมิโน



## การสร้างพันธะเพปไทด์ระหว่างกรดอะมิโนสองตัว

จากรูปที่ 13 เกิดการสร้างพันธะเพปไทด์ (peptide bond) ระหว่าง methionine และ arginine ได้กรดอะมิโนสองตัวที่เชื่อมติดกัน ทั้งนี้พันธะเพปไทด์สร้างขึ้นจากเอนไซม์ที่เป็น RNA ซึ่งอยู่ในไรโบโซมที่เรียกว่า RNA เเร่งปฏิกิริยาหรือ ไรโบไซม์ (ribozyme)

จะเห็นได้ว่าการแปลรหัส จะอ่าน mRNA จากทิศ 5' ไป 3' เสมอและกรดอะมิโนตัวแรกนั้น (methionine) มีหมู่อะมิโนอิสระ ( $-NH_2$ ) ซึ่งไม่เกิดพันธะกับโมเลกุลใด เราเรียกปลายอิสระนี้ว่าปลายอะมิโน (N-terminal) ส่วนกรดอะมิโนตัวที่สอง (arginine) มีหมู่คาร์บอกซิลอิสระ ( $-COOH$ ) ซึ่งไม่เกิดพันธะกับโมเลกุลใด เราเรียกปลายอิสระนี้ว่าปลายคาร์บอกซิล (C-terminal) จากรูปที่ 13) ดังนั้นทิศทางของการแปลรหัสเมื่ออ่าน mRNA จากทิศ 5' ไป 3' จะแปลได้โปรตีนที่มีลำดับกรดอะมิโนจากทิศปลายอะมิโน (N-terminal) ไปสู่ทิศปลายคาร์บอกซิล (C-terminal) เสมอ

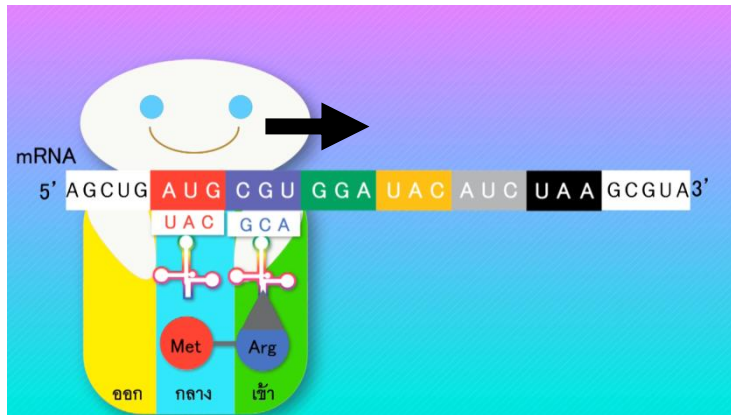


รูปที่ 13 การสร้างพันธะเพปไทด์เชื่อมกรดอะมิโน



## การเคลื่อนที่ของไรโบโซมเพื่อแปลรหัสถัดไปบน mRNA

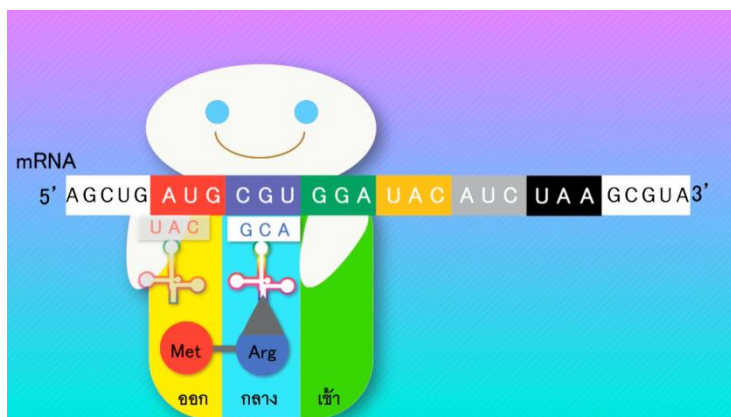
หลังจากนั้นไรโบโซมเลื่อนตำแหน่งไปข้างหน้าของ mRNA จากทิศ 5' ไป 3' ครั้งละ 3 เบส หรือ 1 codon ถัดไป (รูปที่ 14)



รูปที่ 14

ไรโบโซมเคลื่อนไปยัง codon ถัดไป

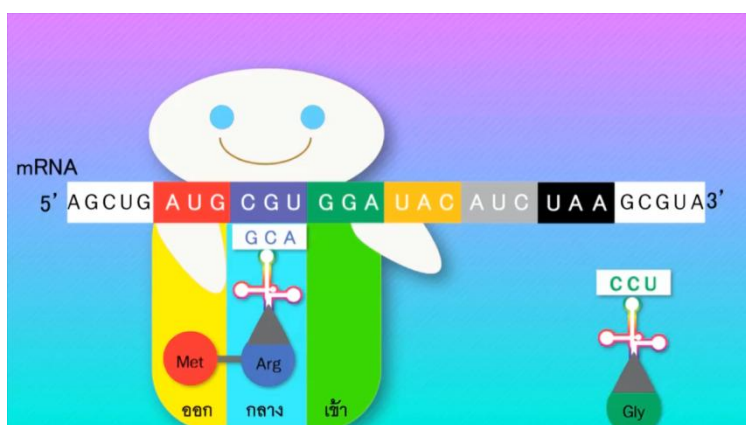
การเลื่อนตำแหน่งของไรโบโซมทำให้ tRNA ตัวแรกที่เคยอยู่ในช่องกลางเลื่อนไปสู่ช่องออกของไรโบโซม (รูปที่ 14-15) เมื่อ tRNA ตัวนี้ไม่มีกรดอะมิโนแล้ว จึงหลุดออกไป (รูปที่ 15)



รูปที่ 15

การหลุดของ tRNA ที่ไม่มีกรดอะมิโน

การเคลื่อนตัวของไรโบโซมยังทำให้ทางเข้าของไรโบโซมว่างลงซึ่งตรงกับ Codon ที่สามของสาย mRNA รอ tRNA ตัวใหม่เข้ามา (รูปที่ 16)



รูปที่ 16

การเข้ามาของ tRNA ตัวใหม่ที่มีกรดอะมิโน



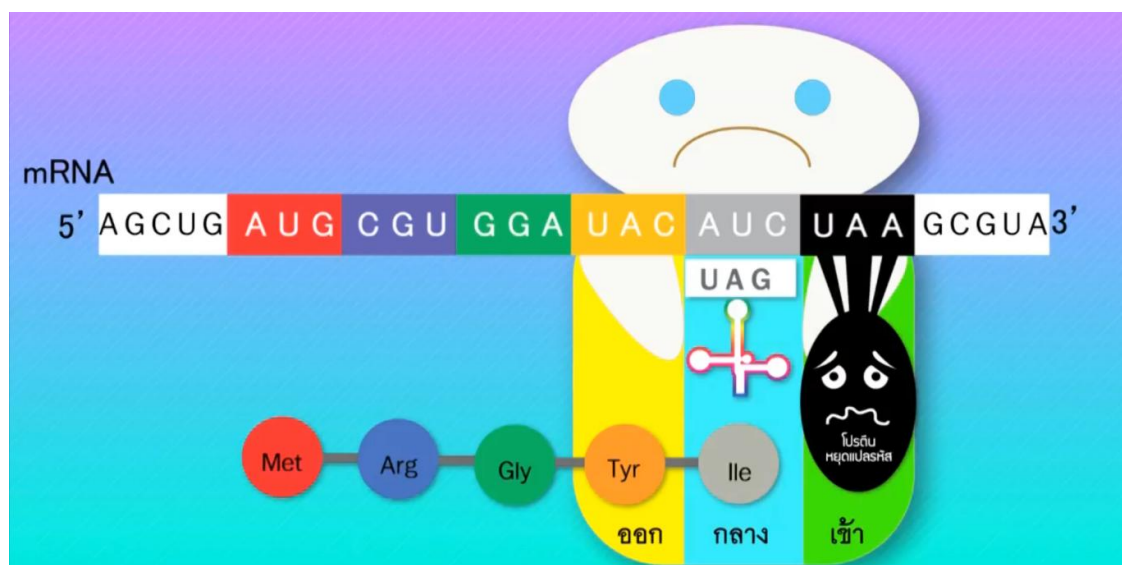
### การสร้างสายเพปไทด์รอบใหม่ (elongation of translation)

เมื่อทางเข้าของไรโบโซมว่างลง จึงเกิดการสังเคราะห์สายของเพปไทด์ต่อไป โดยเกิดซ้ำตามกระบวนการในข้อ (6.4) → (6.5) → (6.6) เพื่อแปลรหัสแต่ละ codon ถัดไปที่ละ 1 codon ทำให้ได้สายของเพปไทด์ยาวขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเรียกว่าสายพอลิเพปไทด์

### การสิ้นสุดการแปลรหัส (termination of translation)

เมื่อไรโบโซมเคลื่อนมาถึง stop codon ดังตัวอย่างในรูปที่ 17 คือ UAA ที่ stop codon นี้จะไม่มี tRNA ตัวใดที่มีเบสคู่สมกับ stop codon นั่นคือเซลล์ไม่มี tRNA และกรดอะมิโนสำหรับ stop codon สิ่งเดียวที่มาจับกับ stop codon ได้คือ โปรตีนหยุดแปลรหัส เมื่อโปรตีนหยุดแปลรหัสนี้มาจับกับ stop codon จะเกิดการเหนี่ยวนำให้โมเลกุลต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างพอลิเพปไทด์ คือ ไรโบโซมหน่วยย่อยเล็ก (ส่วนหัว) ไรโบโซมหน่วยย่อยใหญ่ (ส่วนตัว) tRNA, mRNA และสายของพอลิเพปไทด์แยกเป็นอิสระออกจากกัน และเป็นการสิ้นสุดกระบวนการแปลรหัส (รูปที่ 17)

ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต stop codon จะไม่อยู่ด้านปลายสุดทางด้าน 3' ของโมเลกุล mRNA ดังตัวอย่างในรูปที่ 17 ปลาย 3' ของ mRNA เป็น ..... UAGCGUA 3' ซึ่งจะเห็นได้ว่ามี stop codon (UAA) อยู่ถัดมาด้านในของโมเลกุล mRNA

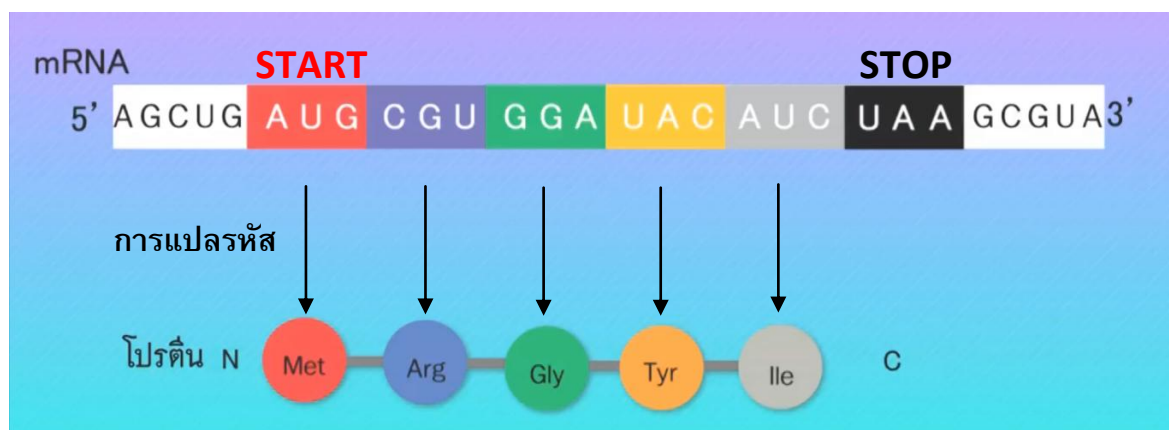


รูปที่ 17 การสิ้นสุดของการแปลรหัส



## พอลิเพปไทด์ผลิตภัณฑ์ที่ได้

จากตัวอย่างรูปที่ 18 การแปลรหัสเริ่มที่ start codon (AUG) จนไปสิ้นสุดที่ stop codon (UAA) ดังนั้นมี codon ที่ผ่านกระบวนการแปลรหัสทั้งสิ้น 6 codon คือ (AUG)-(CGU)-(GGA)-(UAC)-(AUC)-(UAA) แต่ได้สายพอลิเพปไทด์ที่มีกรดอะมิโนเพียง 5 ตัว ทั้งนี้เพราะ codon สุดท้ายเป็น stop codon ที่ไม่ให้กรดอะมิโนชนิดใดเลย การแปลรหัสจะเกิดบน mRNA จากทิศ 5' ไป 3' เสมอ และจะได้สายพอลิเพปไทด์ที่มีลำดับจากทิศปลายอะมิโน (N-terminal) ไปสู่ปลายคาร์บอกซิล (C-terminal) เสมอ



รูปที่ 18 ตัวอย่างการแปลรหัสพันธุกรรมบน mRNA ไปเป็นลำดับกรดอะมิโนบนสายพอลิเพปไทด์

กระบวนการแปลรหัสพันธุกรรมมีความรวดเร็วในระดับหลักสิบกกรดอะมิโนต่อวินาที นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพและมีความถูกต้องแม่นยำสูงมาก (ผิดพลาดเพียงประมาณ 1 ในล้านครั้ง) ด้วยเหตุนี้เองข้อมูลพันธุกรรมในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตจึงมีการสร้างสายพอลิเพปไทด์ได้ถูกต้อง หลังจากนั้นสายพอลิเพปไทด์จะเกิดการม้วนพับเป็นรูปร่างต่าง ๆ เกิดเป็นโมเลกุลโปรตีนโปรตีนที่ได้เหล่านี้จะไปเป็นทั้งโครงสร้างและตัวทำหน้าที่ต่าง ๆ ในเซลล์ ซึ่งผลลัพธ์ที่ตามมาก็คือการแสดงออกของลักษณะทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิด เช่นมีรูปร่างกลม รูปร่างแบน มีสีเหมือนพ่อแม่ มีกลิ่นหอม มีขนาดคุณสมบัติ และหน้าที่การทำงานแบบต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าลักษณะทางพันธุกรรมที่แสดงออกเหล่านี้ล้วนเกิดมาจากแกนกลางของชีววิทยาโมเลกุลทั้งสิ้น นั่นคือ

ข้อมูลพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตบน DNA ถูกถอดรหัสไปเป็น RNA หลังจากนั้น รหัสพันธุกรรมบน RNA ถูกแปลรหัสไปเป็นพอลิเพปไทด์ และสายพอลิเพปไทด์เกิดการม้วนพับเป็นโปรตีนซึ่งมีหน้าที่เป็นโครงสร้างและเป็นตัวทำงานหลักในเซลล์ ได้ผลลัพธ์เป็นลักษณะทางพันธุกรรม

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าลักษณะทางพันธุกรรมหลายลักษณะจะถูกกำหนดอย่างเบ็ดเสร็จเด็ดขาดโดยรหัสพันธุกรรมเพียงอย่างเดียว แต่การแสดงออกของลักษณะทางพันธุกรรมบางลักษณะอาจมีปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมภายนอกมารวมเป็นตัวกำหนดด้วย



## แนวทางในการจัดการเรียนรู้

ผู้สอน สอนเรื่องการแปลรหัสพันธุกรรมแล้ว ให้ผู้เรียนดูสื่อประกอบการสอน โดยควรหลีกเลี่ยงการดูสื่อรวดเดียวตั้งแต่ต้นจนจบเพราะธรรมชาติของเนื้อหาเป็นชีววิทยาโมเลกุลที่มีความซับซ้อนอย่างไรก็ตาม เนื้อหาที่มีความน่าติดตามและเป็นประโยชน์ต่อผู้เรียนในการศึกษาชีววิทยาโมเลกุลต่อไป

ขอแนะนำให้ผู้เรียนดูสื่อเป็นช่วง ๆ โดยกดหยุด เพื่อให้ผู้สอนช่วยอธิบายให้ผู้เรียนเข้าใจ ผู้สอนอาจบอกข้อมูลบางส่วน หรือชี้ให้เห็นข้อมูลบางอย่างที่เป็นการบอกใบ้ ซึ่งจะช่วยกระตุ้นให้ผู้เรียนได้คิดเพื่อหาคำตอบเอง (ฝึกทักษะคิดแก้ปัญหาด้วยตนเอง) ซึ่งดีกว่าการบอกเฉลยให้ผู้เรียนทั้งหมด

กระบวนการต่าง ๆ ในการแปลรหัสนี้ มีเหตุผลประกอบในตัวของมันเองว่าเหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น การเชื่อมโยงกระบวนการที่เกิดขึ้นพร้อมกับเหตุผลที่สนับสนุนดังกล่าว จะทำให้การเรียนการสอนมีความเชื่อมโยง น่าสนใจ นอกจากนี้ ยังช่วยฝึกให้ผู้เรียนมีทักษะการคิดวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์อย่างมีเหตุผลอีกด้วย

สำหรับเนื้อหาที่เป็นขั้นตอนกระบวนการแปลรหัสที่เกิดขึ้นบนไรโบโซมนั้น อาจารย์ไม่จำเป็นต้องเน้นย้ำในรายละเอียดของกระบวนการที่เกิดขึ้น เพราะเนื้อหาอาจจะเกินหลักสูตรไปบ้าง ผู้จัดทำมีจุดประสงค์เพื่อเชื่อมโยงความรู้ทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นเรื่องเดียว จึงมีความจำเป็นต้องแสดงว่ากระบวนการเกิดขึ้นได้อย่างไรตั้งแต่ต้นจนจบ ขอให้ผู้สอนเน้นที่ความคิดรวบยอด (concept) เป็นสำคัญ ซึ่งก็คือบทบาทและหน้าที่ของ mRNA (start codon, stop codon, codon), tRNA (anticodon) และไรโบโซมในการแปลรหัส โดยไม่จำเป็นต้องให้ผู้เรียนจดจำกระบวนการทั้งหมด

ในการเรียนการสอน ผู้สอนอาจถามโจทย์ปัญหา โดยให้ผู้เรียนจับกลุ่มระดมสมองและนำโจทย์มาอภิปรายในห้องเรียน โดยการอภิปรายต้องเปิดโอกาสให้ผู้เรียนผู้ฟังมีการเสนอความคิดเห็นเพิ่มเติมหรือเสนอข้อโต้แย้ง (ถ้ามี) กับผู้อภิปรายด้วย โดยมีผู้สอนเป็นคนช่วยดำเนินการอภิปราย

## โจทย์

### 1. คำถาม เหตุใดเซลล์จึงใช้โมเลกุลโปรตีนเป็นตัวหลักในการทำงานของเซลล์

**ตอบ** เพราะโปรตีนมีความหลากหลายทางเคมีสูง (มีหน่วยย่อยเป็นกรดอะมิโนถึง 20 ชนิด) จึงเกิดรูปร่างได้หลากหลายและซับซ้อน นอกจากนี้โปรตีนยังเกิดสารเชิงซ้อนกับชีวโมเลกุลและสารอนินทรีย์ชนิดอื่นได้ สมบัติเหล่านี้ทำให้โปรตีนเหมาะสมในการเป็นตัวทำงานต่าง ๆ ที่มีอยู่อย่างมากมายและซับซ้อนภายในเซลล์



2. **คำถาม** เซลล์ใช้รหัสพันธุกรรมกี่เบสในการกำหนดชนิดกรดอะมิโน 1 ตัว เหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น

**ตอบ** เซลล์ต้องการรหัสพันธุกรรมอย่างน้อย 20 รหัสสำหรับกำหนดชนิดกรดอะมิโน 20 ชนิด เซลล์ใช้เบสสามเบสเป็นรหัสเพราะสามารถเกิดรหัสพันธุกรรมได้ 64 รหัสซึ่งเพียงพอต่อความต้องการ เซลล์ไม่เลือกจำนวนเบสที่น้อยกว่าสามเบสเพราะได้จำนวนรหัสน้อยเกินไป และเซลล์ก็ไม่เลือกจำนวนเบสที่มากกว่าสามเบสเพราะได้จำนวนรหัสมากเกินไป มีความซับซ้อนสิ้นเปลืองพลังงาน

3. **คำถาม** กฎของการอ่านรหัสพันธุกรรมทั้ง 64 codon มีอะไรบ้าง เหตุใดเซลล์จึงมีกฎเกณฑ์ที่เคร่งครัดเช่นนั้น

**ตอบ** กฎของการอ่านรหัสพันธุกรรมทั้ง 64 codon มีดังนี้

- 3.1) รหัสจะถูกอ่านจากทิศ 5' ไป 3' เสมอ
- 3.2) หนึ่งรหัสพันธุกรรมหรือ 1 codon ประกอบด้วย 3 เบส และแปลรหัสได้เป็นกรดอะมิโนเพียง 1 ชนิดเท่านั้น หรือไม่ให้กรดอะมิโนใดเลยในกรณีที่เป็น stop codon
- 3.3) การแปลรหัสจะเริ่มที่ start codon ( AUG) ซึ่งให้กรดอะมิโน methionine
- 3.4) การแปลรหัสจะสิ้นสุดที่ stop codon ( UAA, UAG หรือ UGA) ซึ่งไม่ให้กรดอะมิโนชนิดใด
- 3.5) กรดอะมิโนชนิดเดียวกันอาจมี codon ได้มากกว่าหนึ่งแบบ
- 3.6) รหัสพันธุกรรมทั้ง 64 codon นี้เหมือนกันในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตเกือบทุกชนิด นั่นคือรหัสมีความเป็นสากล ยกเว้นในไมโทคอนเดรียและคลอโรพลาสต์ ซึ่งมีรหัสพันธุกรรมบางรหัสที่แตกต่างจากรหัสสากลนี้
- 3.7) การอ่านรหัสพันธุกรรมบน RNA จะอ่านเรียงลำดับไปที่ละ codon คือทีละสามเบสและอ่านจากทิศ 5' ไป 3' เสมอ จะไม่มีการอ่านย้อนกลับ อ่านซ้ำ หรือกระโดดข้ามเบส

เซลล์มีกฎการอ่านและแปลรหัสที่ชัดเจน ไม่คลุมเครือ และมีความเคร่งครัด เพื่อที่จะสร้างโปรตีนได้ถูกต้อง ทั้งนี้เป็นการป้องกันการแปลรหัสที่ผิดพลาดซึ่งจะได้โปรตีนที่ผิดปกติและอาจส่งผลให้เซลล์ตายได้



4. คำถาม RNA มีกี่ชนิด แต่ละชนิดมีหน้าที่อย่างไรบ้าง

ตอบ RNA มีสามชนิดคือ

**messenger RNA (mRNA)** ทำหน้าที่นำข้อมูลพันธุกรรมจาก DNA เพื่อไปสร้างโปรตีน

**transfer RNA (tRNA)** ทำหน้าที่ขนส่งกรดอะมิโน

**ribosomal RNA (rRNA)** โมเลกุลชนิดนี้จะไปรวมตัวกับโปรตีนเกิดเป็นไรโบโซม ซึ่งมีหน้าที่เป็นเสมือนโรงงานในการสร้างโปรตีน

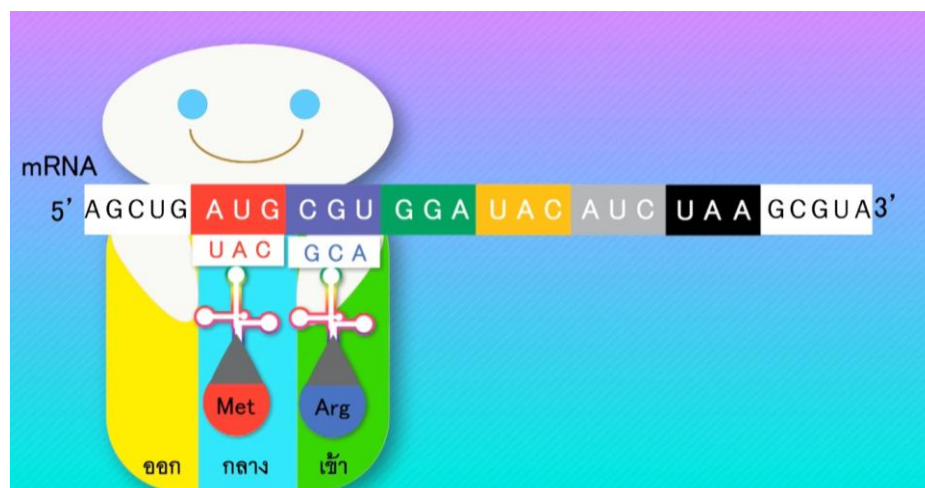
5. คำถาม การแปลรหัสเริ่มต้นที่ codon อะไรและให้กรดอะมิโนชนิดใดเป็นตัวแรก

ตอบ start codon (5' AUG 3') ซึ่งให้กรดอะมิโน methionine

6. คำถาม codon บน mRNA และ anticodon บน tRNA มีความสำคัญอย่างไรในการแปลรหัส

ตอบ การจับกันแบบจำเพาะของเบสคู่สมระหว่าง codon บน mRNA และ anticodon บน tRNA ทำให้ tRNA ให้กรดอะมิโนที่ถูกต้องตรงกับ codon ได้ ตัวอย่างดังรูปด้านล่างเช่น

- tRNA ที่มีกรดอะมิโน methionine มี anticodon 3' UAC 5' ซึ่งเป็นเบสคู่สมกับ codon 5' AUG 3' (แปลรหัสให้ methionine)
- tRNA ที่มีกรดอะมิโน arginine มี anticodon 3' GCA 5' ซึ่งเป็นเบสคู่สมกับ codon 5' CGU 3' (แปลรหัสให้ arginine)





7. **คำถาม** ต้องใช้โมเลกุลอะไรบ้างในกระบวนการแปลรหัส และกระบวนการมีขั้นตอนอย่างไร  
จงอธิบาย

**ตอบ** ต้องใช้โมเลกุล mRNA tRNA ที่พากรดอะมิโนมาด้วย ไรโบโซมหน่วยย่อยเล็ก ไรโบโซม  
หน่วยย่อยใหญ่ และโปรตีนหยุดแปลรหัส กระบวนการมีรายละเอียดตามที่กล่าวแล้ว ซึ่ง  
สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเริ่มต้นของการแปลรหัสเกิดที่ start codon
2. การจับของไรโบโซมหน่วยย่อยเล็กและหน่วยย่อยใหญ่
3. การจับของ tRNA ตัวแรกที่ start codon
4. การจับของ tRNA ตัวที่สองที่ codon ที่สอง
5. การสร้างพันธะเพปไทด์ระหว่างกรดอะมิโนสองตัว ซึ่งเร่งปฏิกิริยาโดยเอนไซม์ที่เป็น RNA (ไรโบไซม์) ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของไรโบโซม
6. การเคลื่อนที่ของไรโบโซมจากทิศ 5' ไป 3'
7. การหลุดออกของ tRNA ตัวแรก และการเข้ามาของ tRNA ตัวที่สาม
8. การเกิดกระบวนการซ้ำเป็นวงจรในข้อ 5 → 6 → 7 ได้สายของพอลิเพปไทด์ยาวขึ้นเรื่อยๆ
9. การสิ้นสุดการแปลรหัส

8. **คำถาม** การแปลรหัสสิ้นสุดที่ codon ชนิดใดและเกิดขึ้นได้อย่างไร

**ตอบ** การแปลรหัสสิ้นสุดที่ stop codon (UAA, UAG หรือ UGA) ซึ่งรหัสทั้งสามชนิดนี้ไม่ให้อะมิโนชนิดใดเลย โดยจะมีโมเลกุลโปรตีนหยุดแปลรหัสมาจับที่ stop codon และทำให้โมเลกุลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการแปลรหัสแยกตัวออกจากกันและเป็นการสิ้นสุดของการถอดรหัส



## ภาคผนวก

### ก. คำอธิบายศัพท์

|                                                                   |                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| anticodon                                                         | ลำดับเบสสามเบสของ tRNA ซึ่งเป็นลำดับเบสคู่สมกับ codon ของ mRNA                                                                           |
| central dogma of molecular biology<br>(แกนกลางของชีววิทยาโมเลกุล) | การส่งต่อข้อมูลพันธุกรรมจาก DNA $\rightarrow$ RNA $\rightarrow$ ไปสร้างเป็นโปรตีน                                                        |
| codon                                                             | ลำดับเบสสามเบสบน mRNA จากทิศ 5' ไป 3' ที่แปลให้กรดอะมิโนหนึ่งชนิด หรือไม่ให้กรดอะมิโนชนิดใดเลยในกรณีที่เป็น stop codon                   |
| complementary base<br>(เบสคู่สม)                                  | เบสสองชนิดที่เข้าคู่กันได้ทางเคมี โดยสามารถเกิดแรงดึงดูดแบบอ่อนต่อกันและกัน จึงเข้าจับกันได้                                             |
| genetic code<br>(รหัสพันธุกรรม)                                   | ลำดับนิวคลีโอไทด์ประกอบด้วยสามเบส บนโมเลกุล RNA หรือ DNA ซึ่งกำหนดชนิดของกรดอะมิโนบนโปรตีน                                               |
| messenger RNA<br>(mRNA)                                           | RNA นำรหัส คือ RNA ที่สร้างจาก DNA แม่แบบมีหน้าที่บันทึกข้อมูลพันธุกรรมเพื่อนำไปแปลรหัสเป็นพอลิเพปไทด์                                   |
| peptide bond<br>(พันธะเพปไทด์)                                    | พันธะเคมีที่เชื่อมกรดอะมิโนต่อกันเป็นสายของโมเลกุลพอลิเพปไทด์                                                                            |
| ribosomal RNA<br>(rRNA)                                           | RNA ในไรโบโซม คือ RNA ที่รวมตัวกับโปรตีนเกิดเป็นสารเชิงซ้อนโมเลกุลขนาดใหญ่ที่เรียกว่าไรโบโซม ซึ่งเป็นเสมือนโรงงานในการแปลรหัสสร้างโปรตีน |
| Ribosome<br>(ไรโบโซม)                                             | สารเชิงซ้อนโมเลกุลขนาดใหญ่ในเซลล์เกิดจากการรวมตัวกันระหว่าง ribosomal RNA และโปรตีน ทำหน้าที่ในการแปลรหัสสร้างพอลิเพปไทด์                |



|                                                           |                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ribozyme<br>(ไรโบไซม์)                                    | RNA ที่สามารถเร่งปฏิกิริยาเคมีได้ ตัวอย่างเช่น Ribozyme ที่อยู่ในโมเลกุลไรโบไซม์สามารถเร่งปฏิกิริยาการสร้างพันธะเพปไทด์ได้                         |
| start codon<br>(รหัสเริ่ม)                                | รหัสพันธุกรรมตัวแรกของการแปลรหัสมีลำดับเบส (5' AUG 3' ) บน mRNA เมื่อถูกแปลแล้วให้กรดอะมิโน methionine                                             |
| stop codon<br>(รหัสหยุด)                                  | รหัสพันธุกรรมสามรหัสที่มีลำดับเบส (5' UAA 3' ) , (5' UAG 3' ) หรือ (5' UGA 3' ) บน mRNA ซึ่งเป็นจุดสิ้นสุดของการแปลรหัสและไม่ให้กรดอะมิโนชนิดใดเลย |
| transcription of<br>genetic code<br>(การถอดรหัสพันธุกรรม) | การถอดรหัสพันธุกรรมจากโมเลกุล DNA เพื่อไปสร้างเป็นโมเลกุล RNA                                                                                      |
| transfer RNA<br>(tRNA)                                    | RNA นำกรดอะมิโน ทำหน้าที่นำกรดอะมิโนมาโยงไรโบไซม์ในกระบวนการแปลรหัส                                                                                |
| translation of<br>genetic code<br>(การแปลรหัสพันธุกรรม)   | การแปลรหัสพันธุกรรมจากโมเลกุล RNA ไปเป็นลำดับกรดอะมิโนบนโมเลกุลของโปรตีน                                                                           |

## ข. แหล่งเรียนรู้เพิ่มเติม

1. สุกัญญา สุนทรส และ วิเชียร ริมพณชยกิจ. 2553. ชีวโมเลกุล. พิมพ์ครั้งที่ 3. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ
2. Nelson, D.L. & Cox M.M. 2008. Lehninger Principles of Biochemistry: DNA & RNA Metabolism. 5<sup>th</sup> edition. W. H. Freeman and Company, New York.
3. Reece. J.B.; Urry, L.A.; Cain, M.L.; Wasserman, S.A.; Minorsky, P.V. and Jackson, R.B. 2011. Campbell Biology 9<sup>th</sup> edition (Global Edition). Pearson Education, Inc., San Francisco.



## รายชื่อสื่อการสอนวิชาชีววิทยาจำนวน 92 ตอน

| ตอนที่ | ชื่อตอน                                                             | อาจารย์ผู้จัดทำสื่อ           |
|--------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1      | ชีววิทยาคืออะไร                                                     | รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพฤทธิกุล  |
| 2      | ชีวจริยธรรม                                                         | รศ.ดร.สุจินดา มัลย์วิจิตรนนท์ |
| 3      | การวางแผนการทดลอง และการตรวจสอบสมมติฐาน                             | ผศ.ดร.พงษ์ชัย หาญยุทธนากร     |
| 4      | ตัวอย่างการทดลองทางชีววิทยา                                         | ผศ.ดร.พงษ์ชัย หาญยุทธนากร     |
| 5      | ส่วนประกอบและวิธีการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง                      | อ.ดร.จิรารักษ์ กิตนะ          |
| 6      | การเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาและประมาณขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง | อ.ดร.จิรารักษ์ กิตนะ          |
| 7      | ปฏิกิริยา polymerization และ hydrolysis                             | อ.ดร.จุฑาพันธุ์ พิณสวัสดิ์    |
| 8      | โปรตีน                                                              | ผศ.ดร.พงษ์ชัย หาญยุทธนากร     |
| 9      | กรดนิวคลีอิก                                                        | ผศ.ดร.พงษ์ชัย หาญยุทธนากร     |
| 10     | การดำรงชีวิตของเซลล์                                                | ผศ.ดร.พงษ์ชัย หาญยุทธนากร     |
| 11     | การสื่อสารระหว่างเซลล์; บทนำ                                        | ผศ.ดร.อรรณณ สัตยาลัย          |
| 12     | การสื่อสารระหว่างเซลล์; การสื่อสารระยะไกลในพืชและสัตว์              | ผศ.ดร.อรรณณ สัตยาลัย          |
| 13     | การสื่อสารระยะไกลในสัตว์                                            | ผศ.ดร.อรรณณ สัตยาลัย          |
| 14     | องค์ประกอบของการสื่อสารระหว่างเซลล์                                 | ผศ.ดร.อรรณณ สัตยาลัย          |
| 15     | ทางเดินอาหารและกระบวนการย่อยอาหารของสัตว์เคี้ยวเอื้อง               | ผศ.ดร.พัชนี สิงห์อาษา         |
| 16     | การย่อยอาหารในลำไส้เล็ก                                             | ผศ.ดร.พัชนี สิงห์อาษา         |
| 17     | ภาพรวมของการสลายอาหารระดับเซลล์                                     | อ.ดร.จุฑาพันธุ์ พิณสวัสดิ์    |
| 18     | ลูกโซ่หายใจ                                                         | อ.ดร.จุฑาพันธุ์ พิณสวัสดิ์    |
| 19     | oxidative phosphorylation                                           | อ.ดร.จุฑาพันธุ์ พิณสวัสดิ์    |
| 20     | การแลกเปลี่ยนแก๊สของสัตว์น้ำและสัตว์บก                              | รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพฤทธิกุล  |
| 21     | เรื่องกลไกการหายใจและศูนย์ควบคุมการหายใจในคน                        | รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพฤทธิกุล  |
| 22     | ไต: หน่วยไต และการสร้างปัสสาวะของไตคน                               | รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพฤทธิกุล  |



| ตอนที่ | ชื่อตอน                                                                                   | อาจารย์ผู้จัดทำสื่อ           |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 23     | ระบบหมุนเวียนเลือดแบบเปิด (open circulatory system) และแบบปิด (closed circulatory system) | รศ.ดร.วิทยา ยศยิ่งยวด         |
| 24     | องค์ประกอบของเลือด หมู่เลือด และ การแข็งตัวของเลือด                                       | รศ.ดร.วิทยา ยศยิ่งยวด         |
| 25     | การป้องกันตนเองของร่างกาย และ ระบบภูมิคุ้มกัน                                             | รศ.ดร.วิทยา ยศยิ่งยวด         |
| 26     | การเคลื่อนที่ของปลา                                                                       | รศ.วีณา เมฆวิชัย              |
| 27     | กลไกการหดตัวของกล้ามเนื้อโครงร่าง                                                         | รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพฤทธิกุล  |
| 28     | การทำงานของเซลล์ประสาท                                                                    | อ.ดร.นพดล กิตนะ               |
| 29     | การถ่ายทอดกระแสประสาทระหว่างเซลล์ประสาท                                                   | อ.ดร.นพดล กิตนะ               |
| 30     | เซลล์รับความรู้สึก                                                                        | รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพฤทธิกุล  |
| 31     | หูและการได้ยิน                                                                            | รศ.ดร.ประคอง ตั้งประพฤทธิกุล  |
| 32     | ฮอร์โมนคืออะไร                                                                            | รศ.ดร.สุจินดา มัลย์วิจิตรนนท์ |
| 33     | ชนิดของฮอร์โมนและชนิดของเซลล์เป้าหมาย                                                     | รศ.ดร.สุจินดา มัลย์วิจิตรนนท์ |
| 34     | การสืบพันธุ์ระดับเซลล์ 1 วัฏจักรเซลล์ อินเทอร์เฟส และ division phase                      | ผศ.ดร.อรรณพ สัตยาลัย          |
| 35     | การสืบพันธุ์ระดับเซลล์ 2 วัฏจักรเซลล์ division phase mitosis                              | ผศ.ดร.อรรณพ สัตยาลัย          |
| 36     | การสืบพันธุ์ระดับเซลล์ 3 วัฏจักรเซลล์; division phase; meiosis                            | ผศ.ดร.อรรณพ สัตยาลัย          |
| 37     | เซลล์พืช                                                                                  | ผศ.ดร.มานิต คิตอยู่           |
| 38     | เนื้อเยื่อพืช                                                                             | ผศ.ดร.มานิต คิตอยู่           |
| 39     | ปากใบและการควบคุมการเปิด-ปิดของปากใบ                                                      | อ.ดร.อัญชลี ใจดี              |
| 40     | การลำเลียงน้ำของพืช                                                                       | รศ.ดร.ปรีดา บุญหลง            |
| 41     | พลังงานชีวิต                                                                              | รศ.ดร.ศุภจิตรา ชัชวาลย์       |
| 42     | ปฏิกิริยาแสง (Light reaction)                                                             | รศ.ดร.ศุภจิตรา ชัชวาลย์       |
| 43     | ปฏิกิริยาคาร์บอน (carbon reaction) – Calvin cycle                                         | ผศ.ดร.บุญธิดา โฆษิตทรัพย์     |
| 44     | กลไกการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช $C_4$                                     | ผศ.ดร.บุญธิดา โฆษิตทรัพย์     |
| 45     | กลไกการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในพืช CAM                                       | ผศ.ดร.บุญธิดา โฆษิตทรัพย์     |
| 46     | ปัจจัยจำกัดในการสังเคราะห์ด้วยแสง                                                         | รศ.ดร.ปรีดา บุญหลง            |



| ตอนที่ | ชื่อตอน                                                            | อาจารย์ผู้จัดทำสื่อ          |
|--------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 47     | โครงสร้างของดอก (Structure of Flower)                              | ผศ.ดร.ต่อศักดิ์ สีลานันท์    |
| 48     | การปฏิสนธิในพืชดอก                                                 | ผศ.ดร.ต่อศักดิ์ สีลานันท์    |
| 49     | การเกิดและโครงสร้างผล                                              | อ.ดร.สร้อยนภา ญาณวัฒน์       |
| 50     | การงอกของเมล็ด                                                     | รศ.นันทนา อังกินันท์         |
| 51     | การวัดการเจริญเติบโตของพืช                                         | อ.ดร.อัญชลี ใจดี             |
| 52     | ออกซิน                                                             | ผศ.ดร.กนกวรรณ เสรีภาพ        |
| 53     | การใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชในการเกษตร                      | ผศ.พัชรา ลิมปะนะเวช          |
| 54     | การเคลื่อนไหวของพืช                                                | ผศ.ดร.กนกวรรณ เสรีภาพ        |
| 55     | ความน่าจะเป็นและกฎแห่งการแยก                                       | ผศ. เรืองวิทย์ บรรจงรัตน์    |
| 56     | กฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ                                        | ผศ. เรืองวิทย์ บรรจงรัตน์    |
| 57     | มัลติเปิลแอลลีล (Multiple alleles)                                 | อ.ดร.วรลักษณ์ เกษตรนันท์     |
| 58     | พอลิยีน (Polygene)                                                 | อ.ดร.วรลักษณ์ เกษตรนันท์     |
| 59     | โครงสร้างของดีเอ็นเอ (DNA structure)                               | อ.ดร.เพลินพิศ โชคชัยชานาญกิจ |
| 60     | โครงสร้างของโครโมโซม (Chromosome structure)                        | อ.ดร.เพลินพิศ โชคชัยชานาญกิจ |
| 61     | การถอดรหัสพันธุกรรม (Transcription)                                | อ.ดร.ธนะกาญจน์ มัญชุพानी     |
| 62     | การแปลรหัสพันธุกรรม (Translation)                                  | อ.ดร.ธนะกาญจน์ มัญชุพानी     |
| 63     | แนะนำพันธุวิศวกรรม                                                 | อ.ดร.ปฐมวดี ญาณทัศนียจิต     |
| 64     | ขั้นตอนของพันธุวิศวกรรม                                            | อ.ดร.ปฐมวดี ญาณทัศนียจิต     |
| 65     | สิ่งมีชีวิตดัดแปลงพันธุกรรม (Genetically modified organisms: GMOs) | อ.ดร.รัชนิกร ธรรมโชติ        |
| 66     | ชาร์ล ดาร์วิน คือใคร                                               | ผศ.ดร.เจษฎา เต็มดวงบริพันธ์  |
| 67     | หลักฐานการเกิดวิวัฒนาการ                                           | ผศ.ดร.เจษฎา เต็มดวงบริพันธ์  |
| 68     | ทฤษฎีวิวัฒนาการของดาร์วิน                                          | ผศ.ดร.เจษฎา เต็มดวงบริพันธ์  |
| 69     | วิวัฒนาการของเชื้อดื้อยา                                           | ผศ.ดร.เจษฎา เต็มดวงบริพันธ์  |



| ตอน<br>ที่ | ชื่อตอน                                                                                  | อาจารย์ผู้จัดทำสื่อ         |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 70         | วิวัฒนาการของมนุษย์                                                                      | ผศ.ดร.เจษฎา เต็มดวงบริพันธ์ |
| 71         | อาณาจักรมอเนอรา                                                                          | ผศ.ดร.รสริน พลวัฒน์         |
| 72         | อาณาจักรโพรทิสตา                                                                         | ผศ.ดร.รสริน พลวัฒน์         |
| 73         | อาณาจักรฟังไจ                                                                            | ผศ.ดร.จิตรตรา เพ็ญเขียว     |
| 74         | ความหลากหลายของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง                                                   | ผศ.ดร.อาจอง ประทัดสุนทรสาร  |
| 75         | ความหลากหลายของสัตว์มีกระดูกสันหลัง                                                      | รศ.วีณา เมฆวิชัย            |
| 76         | กลไกของพฤติกรรม                                                                          | รศ.ดร.อุษณีย์ ยศยิ่งยวด     |
| 77         | พฤติกรรมการเรียนรู้แบบต่าง ๆ                                                             | รศ.ดร.อุษณีย์ ยศยิ่งยวด     |
| 78         | การสื่อสารระหว่างสัตว์                                                                   | รศ.ดร.อุษณีย์ ยศยิ่งยวด     |
| 79         | แนวคิดเกี่ยวกับระบบนิเวศ                                                                 | ผศ.ดร.อาจอง ประทัดสุนทรสาร  |
| 80         | ไบโอมบนบก                                                                                | ผศ.ดร.อาจอง ประทัดสุนทรสาร  |
| 81         | การสำรวจระบบนิเวศบนบก                                                                    | ผศ.ดร.อาจอง ประทัดสุนทรสาร  |
| 82         | ความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งมีชีวิตกับปัจจัยทางกายภาพ                                         | ผศ.ดร.วิเชษฐ คุนเชื้อ       |
| 83         | ความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ ในระบบนิเวศ                                      | ผศ.ดร.วิเชษฐ คุนเชื้อ       |
| 84         | โซ่อาหารและใยอาหาร                                                                       | ผศ.ดร.วิเชษฐ คุนเชื้อ       |
| 85         | วัฏจักรสาร                                                                               | ผศ.ดร.วิเชษฐ คุนเชื้อ       |
| 86         | ความหมายของคำว่าประชากร(population) และประวัติการศึกษาประชากร                            | รศ.ดร.กำธร ธีรคุปต์         |
| 87         | วิธีการหาความหนาแน่นของประชากรโดยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบวางแปลง (quadrat sampling method) | รศ.ดร.กำธร ธีรคุปต์         |
| 88         | การเพิ่มขนาดของประชากร (population growth)                                               | รศ.ดร.กำธร ธีรคุปต์         |
| 89         | โครงสร้างอายุ (age structure) ของประชากร                                                 | รศ.ดร.กำธร ธีรคุปต์         |
| 90         | ประเภทของทรัพยากร                                                                        | อ.ดร.พงษ์ชัย ดำรงโรจน์วัฒนา |
| 91         | ปัญหาที่มีต่อทรัพยากรธรรมชาติและสภาพแวดล้อม                                              | อ.ดร.พงษ์ชัย ดำรงโรจน์วัฒนา |
| 92         | หลักการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ                                                          | อ.ดร.พงษ์ชัย ดำรงโรจน์วัฒนา |