



ทำไม..? เลือด..จึงมีสีแดง

นพ.จักรกฤษณ์ เอื้อสุนทรวัฒนา รศ. นพ.อภัยชัย สุระ

สวัสดีครับ พบกันอีกเช่นเคยในบทความชุด “เล่าเรื่องเลือด” ในจุลสารชมรมธาลัสซีเมีย นะครับ ตอนที่เขียนต้นฉบับตอนนี้อากาศกำลังร้อนมาก แต่กว่าจุลสารจะถึงมือคุณผู้อ่าน ก็อาจจะใกล้ๆ จะมีฝนตกลงมาแล้ว [หรืออาจจะมีย่าน้ำท่วมไปเรียบร้อยแล้ว] อย่างไรก็ตามจะรักษาสุขภาพกันด้วยนะครับ

เรื่องที่จะขอเล่าในฉบับนี้เป็นเรื่องที่เราคุ้นกันมาแต่ก่อน แต่บอกว่าเลือดของเรามันมีสีแดง (จบข่าวแต่เพียงเท่านี้ อ้อ ไม่ใช่ละ) แต่คนส่วนใหญ่อาจจะไม่เคยทราบจริงๆ ว่าทำไมมันจึงมีสีแดงได้ ซึ่งเรื่องนี้ก็เป็นความลึกลับของเอกภพที่มีความซับซ้อนและน่าสนใจน้อยๆ ภาพถ่ายหลุมดำที่เดียวครับ (โอเค อันที่จริงมันคงจะไม่ได้น่าสนใจถึงขนาดนั้น แต่ผมอุตส่าห์เกริ่นมาขนาดนี้แล้วอย่างไรก็ช่วยแจ้งอกแจ้งใจอ่านต่อไปละกันนะครับ)

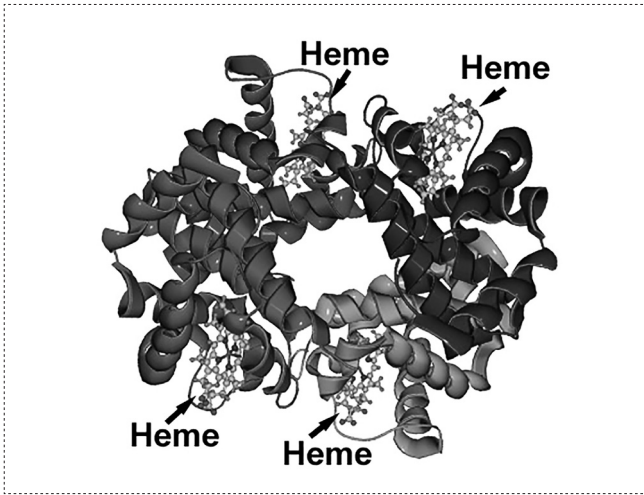
อันที่จริง ถ้าถามว่าทำไมเลือดของเราจึงมีสีแดง คุณผู้อ่านจำนวนมากอาจจะตอบได้ว่าก็เป็นเพราะในเม็ดเลือดแดงมีโปรตีนฮีโมโกลบินซึ่งมีสีแดงอยู่นะสิ (ง่ายจะตายไป) ซึ่งก็เป็นคำตอบที่ถูกต้องนะครับ แต่ถ้าถามต่อไปว่าแล้วทำไมฮีโมโกลบินถึงมีสีแดงได้ละ คุณผู้อ่านส่วนใหญ่ก็อาจจะมองผมแปลกๆ แล้วก็บอกว่าจะไปรู้เหรอ คงเพราะมันมีเหล็กอยู่ในฮีโมโกลบินมันพอจับกับออกซิเจนแล้วมันเลยกลายเป็นสีมีสีแดงๆ ใกล้เคียงจริงๆ แล้วไม่ใช่หรอครับ (มีคนทีเข้าใจแบบนี้อยู่เยอะพอสมควร) แต่เรื่องนี้ก็มีคำอธิบายที่ถูกต้องซึ่งออกจะซับซ้อนกว่านั้นอยู่นะครับ

แต่ก่อนจะไปอธิบายเรื่องว่าทำไมฮีโมโกลบินจึงมีสีแดง ขออนุญาตเล่าเพิ่มเติมอีกนิดหนึ่งก่อนครับ ว่าไม่ใช่ว่าเลือดของสัตว์ทุกชนิดจะต้องมีสีแดงเสมอไป (และความจริงแล้วก็ไม่ใช่ว่าสัตว์ทุกชนิดจะต้องมีเลือดเสมอไปด้วย) โดยเลือดจะมีสีแดงก็เฉพาะแต่ในสัตว์ที่มีฮีโมโกลบินในเลือดเท่านั้น แต่ในสัตว์บางชนิด เช่น พวกแมลงส่วนใหญ่ จะมีของเหลวที่ทำหน้าที่เหมือนเลือด แต่ไม่ได้มีหน้าที่ในการลำเลียงออกซิเจน เพราะมันใช้ระบบท่อลมในการส่งออกซิเจนไปตามเนื้อเยื่อต่างๆ แทนเลือดของสัตว์พวกนี้จึงไม่มีสีหรือเป็นสีเหลืองจางๆ (ส่วนเวลาที่เรานับขยี้แล้วมีเลือดแดงแตกกระจายในบริเวณนั้น อันนั้นเป็นเลือดเราที่ยุงเพิ่งดูดมา ไม่ใช่เลือดของยุงครับ) หรือในสัตว์กลุ่มแมลงบางชนิด สัตว์ขาข้ออื่นๆ เช่น กุ้ง ปู แมงดา หรือพวกหอยต่างๆ จะมีสารกลุ่มฮีโมไซยานิน (haemocyanins) ซึ่งมีทองแดงเป็นองค์ประกอบอยู่ (แทนที่จะเป็นเหล็กภายในฮีโมโกลบิน) เพื่อทำหน้าที่ลำเลียงออกซิเจนแทนฮีโมโกลบิน ซึ่งสารกลุ่ม

ฮีโมไซยานินนี้ ถึงชื่อจะคล้ายๆ กับไซยาไนด์ แต่ไม่ได้เกี่ยวอะไรกันเลยนะครับ คือทั้งฮีโมไซยานิน และไซยาไนด์ต่างก็ได้ชื่อมาจากคำว่า “ไซยาน” (cyan) ซึ่งมีที่มาจากคำกรีก kuanos หมายถึงถึงสีน้ำเงิน ทั้งนี้เนื่องจากว่าฮีโมไซยานินทำให้เลือดของสัตว์กลุ่มนี้มีสีน้ำเงินอมเขียวเวลาที่มันจับกับออกซิเจน (ส่วนเวลาไม่จับจะเป็นสีเทาๆ) ส่วนไซยาไนด์ได้ชื่ออย่างนั้นเพราะมันเป็นองค์ประกอบของสีย้อมสีน้ำเงินที่เรียกว่า Prussian blue ครับ (แต่อันนี้ยกเว้นหอยแครงซึ่งมีฮีโมโกลบินด้วย ทำให้มันมีเลือดสีแดงๆ อยู่ด้วยเวลาที่เรานำหอยแครงลวก ซึ่งก็เป็นเหตุผลที่ว่าทำไมเราจึงแนะนำให้ชาวชมรมที่มีปัญหาเหล็กเกินหลีกเลี่ยงการรับประทานหอยแครง แต่ไม่ได้แนะนำให้หลีกเลี่ยงหอยชนิดอื่นๆ อย่างหอยแมลงภู่นิวซีแลนด์, หอยทากฝรั่งเศส หรือหอยเป่าซ้อ ซึ่งก็ไม่ใช่เพราะเราทำตัวหัวสูงแต่อย่างใด)

มีประเด็นที่น่าสนใจอยู่นิดหนึ่งว่าทำไมสัตว์พวกนี้ถึงเลือกใช้ฮีโมไซยานินแทนที่จะเป็นฮีโมโกลบินในการลำเลียงออกซิเจน (และความจริงแล้วดูเหมือนว่าโปรตีนกลุ่มฮีโมไซยานินจะเกิดขึ้นมาทีหลังในช่วงการวิวัฒนาการ ในขณะที่ฮีโมโกลบินเป็นโปรตีนที่เก่าแก่กว่ามาก ซึ่งก็แปลว่าฮีโมไซยานินพัฒนาขึ้นมาเพราะจำเป็นต่อการใช้งานจริงๆ) คือดูเหมือนว่าเหตุผลหลักๆ อาจจะเป็นเพราะว่าในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำและมีความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำ (อย่างเช่นใต้ทะเล ซึ่งก็มักจะเป็นที่อยู่ของสิ่งมีชีวิตที่ใช้ ฮีโมไซยานิน) ฮีโมไซยานินจะทำหน้าที่ลำเลียงออกซิเจนได้ดีกว่าฮีโมโกลบินครับ

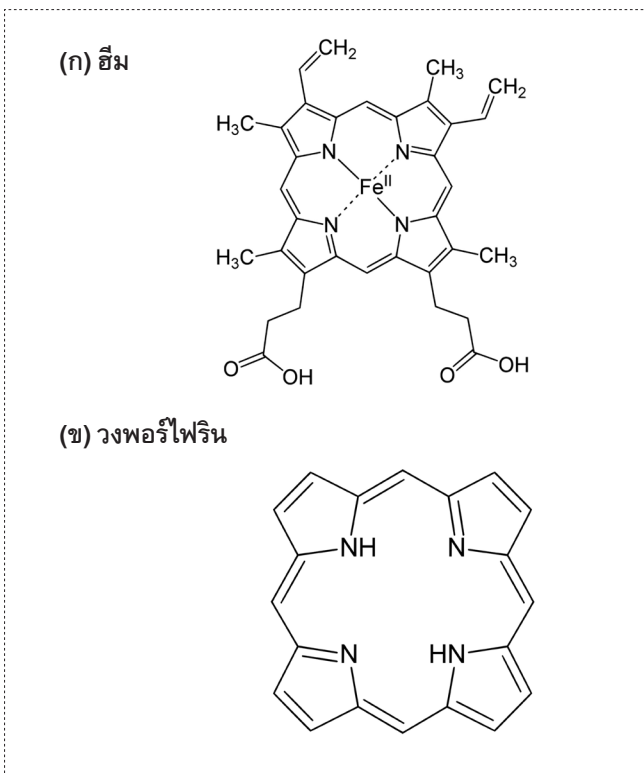
กลับมาต่อกันเรื่องทำไมฮีโมโกลบินถึงมีสีแดงกันต่อ นะครับ ซึ่งถ้าจะอธิบายเรื่องนี้ก็ต้องมาดูโครงสร้างของฮีโมโกลบินกันก่อน ซึ่งเมื่อหลายตอนที่แล้วเราเคยพูดถึงถึงเรื่องของฮีโมโกลบินไปแล้ว แต่ผมขอฉายซ้ำคร่าวๆ ก็แล้วกันนะครับ คือในฮีโมโกลบินแต่ละก้อนจะประกอบขึ้นจากโปรตีนที่เป็นหน่วยย่อยชื่อโกลบิน (globin) 4 โมเลกุล และโกลบินแต่ละโมเลกุลก็จะจับอยู่กับฮีมหนึ่งโมเลกุล ซึ่งข้างในฮีมนี้จะมีอะตอมของเหล็กอยู่ซึ่งจะเป็นตำแหน่งที่ออกซิเจนจะมาเกาะเวลาที่มันจะลำเลียงออกซิเจน



รูปที่ 1 โครงสร้างของฮีโมโกลบิน

ฮีมนี่เองครับที่ทำให้ฮีโมโกลบินมีสีแดง ทั้งนี้ก็เนื่องจากลักษณะของโมเลกุลของมันที่เกิดขึ้นจากวงพอร์ไฟริน (porphyrin) ที่มีเหล็กมาเกาะอยู่ครับ

พอร์ไฟรินนี้เป็นกลุ่มสารประกอบอินทรีย์ที่พบได้บ่อยในสิ่งมีชีวิต โมเลกุลของมันมีลักษณะเป็นวงซึ่งมีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยวอยู่โดยรอบทำให้เกิดเป็นโครงสร้างคอนจูเกตขึ้นมา (conjugated system อันนี้เป็นศัพท์ทางเคมี ยังไม่มีคำไทยใช้ครับ) ซึ่งในโครงสร้างคอนจูเกตลักษณะนี้ อิเล็กตรอนภายในวงจะมีอิสระในการเคลื่อนที่ไปได้รอบๆ วง ทำให้โมเลกุลมีเสถียรภาพค่อนข้างสูง และระดับพลังงานในภาวะปกติ (ground state) กับภาวะที่ถูกกระตุ้น (excited state) ไม่ต่างกันมากนัก

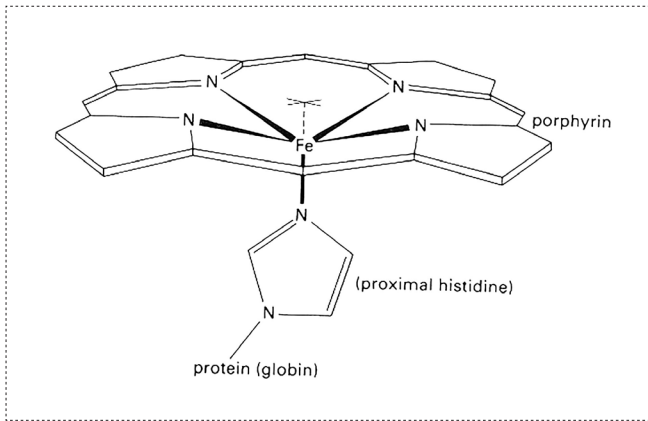


รูปที่ 2 โครงสร้างของฮีมและวงพอร์ไฟริน

โดยธรรมชาติแล้วเมื่อมีแสงมากระทบกับโมเลกุล โฟตอน (อนุภาคของแสง) ส่วนที่มีระดับพลังงานเท่ากับความแตกต่างของพลังงานระหว่างภาวะปกติกับภาวะที่ถูกกระตุ้นของโมเลกุลนั้นจะถูกดูดซับเอาไว้ และเนื่องจากว่าพลังงานของโฟตอนจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงนั้น (หรืออีกนัยหนึ่งก็คือขึ้นอยู่กับสีของมันนั่นเอง) สิ่งที่เกิดขึ้นก็คือแสงที่มีช่วงสีตรงกันผลต่างของระดับพลังงานของโมเลกุลก็就会被ดูดซับเอาไว้ ในขณะที่แสงสีอื่นๆ จะถูกสะท้อนออกมาให้เราเห็นได้ โดยโมเลกุลที่ยังมีระดับการคอนจูเกตมาก ก็จะมีผลต่างพลังงานน้อย และจะดูดซับแสงในช่วงที่มีความยาวคลื่นยาวคือช่วงค่อนข้างมาทางด้านสีแดง ในขณะที่โมเลกุลที่มีการคอนจูเกตไม่มากก็จะดูดซับแสงในช่วงที่มีความยาวคลื่นสั้น เช่นสีม่วง สีน้ำเงิน หรืออัลตราไวโอเล็ต เช่น โมเลกุลของเบต้าแคโรทีน (ซึ่งพบได้ในแครอท) มีการคอนจูเกตในช่วงสั้นๆ จึงดูดซับแสงในช่วงความยาวคลื่นค่อนข้างสั้นคือช่วงสีเขียว-น้ำเงิน และสะท้อนแสงสีส้มกลับออกมา เราจึงเห็นแครอทเป็นสีส้มครับ

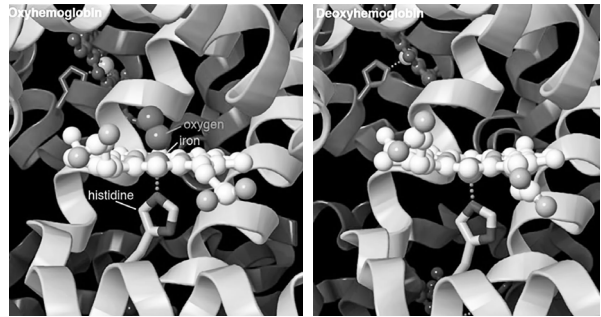
เนื่องจากโมเลกุลในกลุ่มพอร์ไฟรินเป็นวงที่มีโครงสร้างคอนจูเกตขนาดใหญ่ มันจึงมักจะดูดซับแสงได้ดีและมักจะให้สีที่สดใส (ชื่อของพอร์ไฟรินเองก็มีที่มาจากคำกรีก Porphura ซึ่งหมายถึงสีม่วงครับ คำว่าสีม่วง (purple) ในภาษาอังกฤษก็มีที่มาจากคำนี้เช่นกัน) โดยจะเป็นสีอะไรก็ขึ้นอยู่กับโครงสร้างและองค์ประกอบอื่นๆ ครับ เช่นคลอโรฟิลล์ซึ่งเป็นองค์ประกอบในเซลล์ของพืช มีโครงสร้างหลักเป็นวงพอร์ไฟรินที่มีอะตอมของแมกนีเซียมอยู่ตรงกลาง ซึ่งสามารถดูดซับแสงในย่านสีน้ำเงินและสีแดงได้ดี จึงสะท้อนแต่แสงสีเขียวกลับมาให้เราเห็นเยินๆ สบายตาครับ

สำหรับฮีม เป็นวงพอร์ไฟรินที่มีอะตอมของเหล็กอยู่ตรงกลาง แต่อะตอมของเหล็กในฮีมนี่ ในสภาวะปกติที่ไม่ได้จับกับออกซิเจน จะมีประจุบวกอยู่ 2 (หรือก็คือมี อิเล็กตรอนขาดไปสองตัว) ซึ่งจะมีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างตรงกลางวงพอร์ไฟรินเล็กน้อย ทำให้มันไม่สามารถวางอยู่ตรงกลางวงพอดีได้ แต่จะต้องหลุดค่อนข้างไปทางด้านล่างแทน (คือวงพอร์ไฟรินทั้งวงเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะแบนคล้ายๆ แผ่นกระดาษ เหล็กจะอยู่ตรงกลางวงแต่หลุดค่อนข้างมาใต้แผ่นกระดาษครับ) โดยทางด้านล่างนี้ มันจะยึดอยู่กับกรดอะมิโนอีกตัวหนึ่งในโปรตีนโกลบินด้วยเหมือนกันครับ ซึ่งทำให้โครงสร้างทั้งหมดของฮีมในสภาวะนี้มีรูปร่างคล้ายๆ กับหลังคารูปโดม การที่มีอะตอมของเหล็กอยู่ด้วยนี้ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในฮีม ซึ่งในภาวะนี้ ฮีมจะดูดซับแสงในย่านสีเหลือง ทำให้มันมีสีออกม่วงๆ น้ำเงินๆ (หรือเรามักจะบรรยายว่าเป็นสีแดงคล้ำๆ) ครับ



รูปที่ 3 โครงสร้างรูปโดมของเหล็ก และ พอร์ไฟรินในฮีโม

เมื่อฮีโมจับกับออกซิเจน ก็จะจับด้วยเหล็กตรงกลางนี้ซึ่งเหล็กอะตอมนี้จะเสียอิเล็กตรอนอีกหนึ่งตัวเพื่อไปจับกับออกซิเจนในด้านตรงข้ามกันกับกรดอะมิโนตัวที่มันจับอยู่เดิม ทำให้ประจุบวกของเหล็กตอนนี้กลายเป็น 3 และทำให้ขนาดของมัน “เล็กลง” จนสามารถมาวางขวางตรงกลางวงพอร์ไฟรินได้พอดี และทำให้วงพอร์ไฟรินที่เมื่อกี้ยังเป็นรูปโดมอยู่แบนราบลงมา ซึ่งพอเป็นอย่างนั้น อิเล็กตรอนในเหล็กก็จะไปกวนการกระจายของอิเล็กตรอนในวงพอร์ไฟริน ทำให้ความแตกต่างของระดับพลังงานสูงขึ้น (หรืออีกนัยหนึ่งคือโมเลกุลมีเสถียรภาพลดลง ซึ่งก็เป็นข้อดีเพราะทำให้มันมีแนวโน้มจะปล่อยออกซิเจนออกมาให้เนื้อเยื่อ ถ้าโมเลกุลมีเสถียร) ซึ่งฮีโมในภาวะที่จับกับออกซิเจนอยู่นี้ จะดูดซับแสงในย่านสีเขียว-น้ำเงิน (พูดถึงเรื่องนี้ จริงๆ แล้วความ



รูปที่ 4 รูปร่างของฮีโมขณะไม่ได้จับกับออกซิเจน และขณะจับกับออกซิเจน (มองจากด้านข้าง) สังเกตว่าอะตอมของเหล็กจะขยับขึ้นลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับตำแหน่งของวงพอร์ไฟริน ครับ

สามารถในการแยกสีเขียว กับน้ำเงินออกจากกันนี้ ก็เป็นเรื่องที่ขึ้นกับภาษาและวัฒนธรรมด้วยเหมือนกันครับ ว่างๆ จะเล่าให้ฟัง) ทำให้เราเห็นมันเป็นสีแดงนั่นเองครับ (ซัฟฟ่อนไหมครับที่เราอุตสาหกรรมเคมีและคอนกรีตมีฟิสก์มา นอกจากเอาไว้อบ GAT-PAT เชื่อมโยงแล้ว ก็เพื่อเอามาทำอย่างนี้ละครับ ฮ่า)

ถึงตรงนี้คุณผู้อ่านก็คงสามารถเอาเรื่องนี้ไปคุยชมคนที่ไม่มีโอกาสได้อ่านจุลสารชมรมธาลัสซีเมียได้แล้วนะครับ (ควรทำหน้าที่แบบฉันยังรู้ความลับของเอกภพด้วย เพื่อให้ได้อารมณ์ยิ่งขึ้น) แต่ถ้าจะให้ดีก็แบ่งให้เพื่อนอ่านด้วย หรือไม่ก็แนะนำให้เขาสมัครสมาชิกไปเลย (ของดีจ้ะ แบนี่เราควรบอกต่อจริงไหมครับ) ฉบับนี้ขอลาไปแต่เพียงเท่านี้ก่อนนะครับ พบกันใหม่ฉบับหน้าครับ

เอกสารอ้างอิง

1. Casiday R, Frey R (2013) Hemoglobin and the heme group: metal complexes in the blood for oxygen transport: inorganic synthesis experiment. http://www.chemistry.wustl.edu/~edudev/LabTutorials/CourseTutorials/Tutorials/Hemoglobin/151_T3_heme.pdf
2. Dutta S, Goodsell D (2003) RCSB PDB-101 Molecule of the month: hemoglobin. doi:10.2210/rcsb_pdb/mom_2003_5
3. Gregory K. Hemoglobin. <http://web.stanford.edu/~kaleeg/chem32/hemo/>
4. Kim BF, Bohandy J (1981) Spectroscopy of porphyrins. John Hopkins APL Technical Digest 2(3): 153-63.
5. Lipton M (2014) Pi-conjugation. Chemistry LibreText. [https://chem.libretexts.org/Courses/Purdue/Purdue%3A_Chem_26505%3A_Organic_Chemistry_I_\(Lipton\)/Chapter_1_Electronic_Structure_and_Chemical_Bonding/1.10%3A_Pi_Conjugation](https://chem.libretexts.org/Courses/Purdue/Purdue%3A_Chem_26505%3A_Organic_Chemistry_I_(Lipton)/Chapter_1_Electronic_Structure_and_Chemical_Bonding/1.10%3A_Pi_Conjugation)
6. A brief discussion on color. <https://people.chem.umass.edu/samal/269/color.pdf>