บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้วิเคราะห์ปัญหาในงานวิจัยซึ่งประกอบไปด้วย การถ่ายเทความร้อน พื้นฐานการกระจายความร้อนในเนื้อเยื่อ สมการความร้อนทางชีววิทยา ลักษณะทางกายวิภาคเบื้องต้นของตับ โรคมะเร็ง และหลักการทำลายเซลล์มะเร็งตับด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

2.2 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

เมื่อใดก็ตามที่จุดสองจุดมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันก็จะมีพลังงานถ่ายเทจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ พลังงานที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยอิทธิพลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันนี้เรียกว่าความร้อน ในการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน สามารถแยกพิจารณาออกได้อย่างเด่นชัดเป็น 3 แบบคือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน อันที่จริงแล้วการกระจายของอุณหภูมิในตัวกลางหนึ่งจะถูกควบคุมโดยอิทธิพลรวมของการถ่ายเทความร้อนทั้งสามแบบตามที่กล่าวเพราะฉะนั้นตามความเป็นจริงแล้ว จึงไม่สามารถแยกแบบหนึ่งแบบใดได้อย่างสิ้นเชิงจากแบบอื่นๆ ที่เหลือได้ อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ เราจะแยกพิจารณาเป็นแบบใดแบบหนึ่งได้เช่น พิจารณาเฉพาะการนำความร้อนอย่างเดียว ถ้าเมื่อไรก็ตามอิทธิพลของการพาและการแผ่รังสีมีผลต่อการวิเคราะห์น้อยมาก ดังนั้นเราจึงสามารถแยกพิจารณาในแต่ละแบบของการถ่ายเทความร้อนได้ตามสมติฐานดังกล่าว

2.2.1 การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

การนำความร้อนเป็นรูปแบบหนึ่งของการถ่ายเทความร้อน ในลักษณะของการแลกเปลี่ยน จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยเคลื่อนที่แบบจลน์ (Kinetic motion) หรือการชนกันโดยตรงของโมเลกุลซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในของไหลที่หยุดนิ่ง ส่วนในกรณีของโลหะนั้นจะเป็นการไหลของกระแสอิเล็กตรอน สำหรับของแข็งที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีจะมีจำนวนอิเล็กตรอนมากมายที่เคลื่อนไหวอยู่ภายในโครงสร้างของโมเลกุล (Lattice) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าวัตถุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีจะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีตามไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น ทองแดง เงิน เหล็ก ฯลฯ อันเป็นผลจากการนำหรือการถ่ายทอดพลังงานความร้อนโดยอิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้

กฎสหสัมพันธ์ของการนำความร้อนโดยถือเกณฑ์จากการสังเกตจากการทดลอง กำเนิดจากบิ-โอท์ (Biot) แต่ต่อมานักฟิสิกส์- คณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ โจเซฟ ฟูริเยร์ (Joseph Fourier) นำ

หลักการนี้มาใช้วิเคราะห์เป็นทฤษฎีความร้อน กฎนี้กล่าวว่า อัตราการไหลของการนำความร้อนในทิศทางที่กำหนดเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อนและเกร์เดียนของอุณหภูมิในทิศทางนั้น สำหรับการไหลของความร้อนในทิศทาง x กฎฟูริเยร์กำหนดเป็น

$$q_x = -kA\frac{dT}{dx} \tag{2.1}$$

$$q_x'' = \frac{q_x}{A} = -k\frac{dT}{dx} \tag{2.2}$$

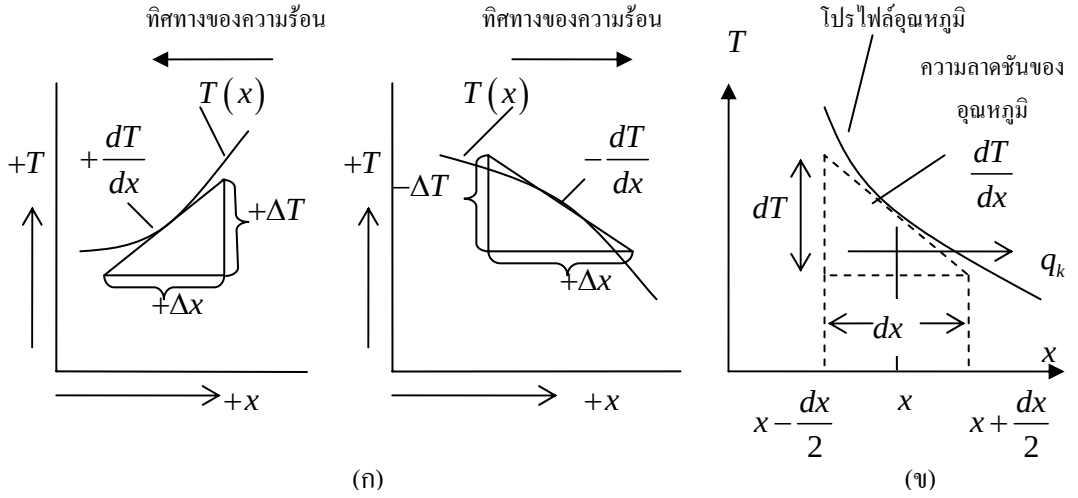
โดยที่ q_x คือ อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่ A ในทิศทางบวก x มีหน่วยเป็น W

q_x'' คือ ฟลักซ์ความร้อนในทิศทางบวก x มีหน่วยเป็น W/m^2

k คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัตถุ (Thermal conductivity of material) มีหน่วยเป็น $W/m\cdot K$

A คือ พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน มีหน่วยเป็น m^2

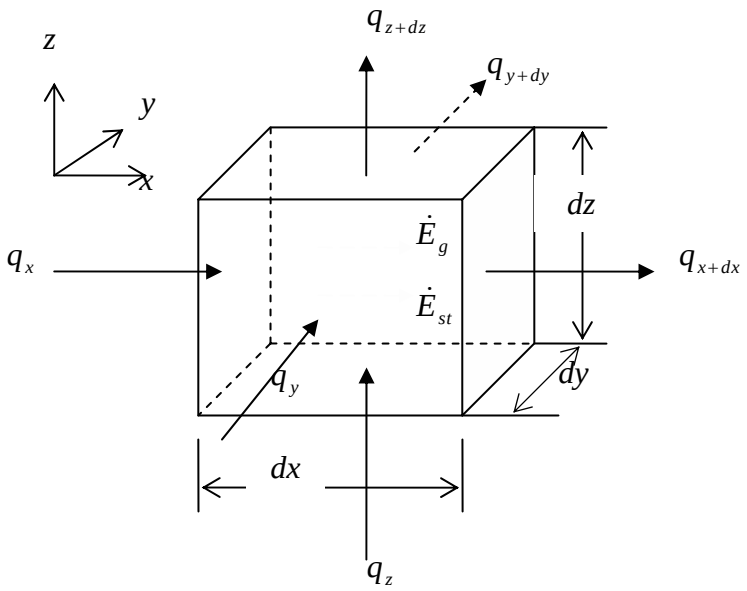
จากสมการ 2.1 นี้มีชื่อเรียกว่า กฎการนำความร้อนของฟูริเยร์ (Fourier's law of conduction) ถ้าอุณหภูมิลดลงในทิศทางบวกของ x แล้ว dT/dx เป็นลบ ดังนั้น q_x'' (หรือ q_x) มีค่าเป็นบวก เนื่องจากสมการมีเครื่องหมายติดลบอยู่ เพราะฉะนั้นเครื่องหมายลบจึงต้องใส่ในสมการและเพื่อให้แน่ใจว่า q_x'' (หรือ q_x) เป็นปริมาณบวก เมื่อการไหลของความร้อนอยู่ในทิศทางบวกของ x ในทางกลับกันเมื่อทางด้านขวามือของสมการเป็นลบ แสดงว่าการไหลของความร้อนอยู่ในทิศทางลบของ x



รูปที่ 2.1 (ก) แสดงเครื่องหมายของค่า dT/dx สำหรับการนำความร้อน
(ข) แสดงทิศทางการไหลของความร้อน

จุดประสงค์หลักในการวิเคราะห์การนำความร้อนก็เพื่อที่จะหาสนามอุณหภูมิ(Temperature field) ในตัวกลางหนึ่งซึ่งเป็นผลมาจากเงื่อนไขซึ่งสอดคล้องกับขอบเขตของมัน นั่นคือ ต้องทราบการกระจายของอุณหภูมิ (Temperature distribution) เมื่อทราบค่านี้ก็จะสามารถหาฟลักซ์ความร้อนที่จุดใดๆ ในตัวกลางนั้น จากกฎฟูริเยร์ การหาค่านี้ทำได้โดยใช้กฎของพลังงาน (Energy conservation) กับปริมาตรควบคุมดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งระบุกระบวนการถ่ายพลังงาน และใช้สมการอัตราที่เหมาะสม ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งคำตอบของมันจะให้การกระจายอุณหภูมิในตัวกลางหรือวัตถุนั้น

พิจารณาตัวกลางเนื้อเดียวกันซึ่งมีเกร์เดียนอุณหภูมิจริง และการกระจายอุณหภูมิ $T(x,y,z)$ กำหนดในพิกัดคาร์ทีเชียน (Cartesian coordinates) เรากำหนดปริมาตรควบคุมเล็กมากๆ $dx.dy.dz$ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.2 ถ้ามีเกร์เดียนอุณหภูมิแล้วการนำความร้อนจะเกิดขึ้นข้ามแต่ละอันของผิวควบคุม อัตราการนำความร้อนนี้จะตั้งฉากกับผิวควบคุมแต่ละอันที่ตำแหน่งโคออร์ดิเนต x,y,z ซึ่งแสดงโดยเทอมของ q_x, q_y, q_z ตามลำดับ อัตราการนำความร้อนที่ผิวตรงข้ามสามารถกระจายโดยอนุกรมเทย์เลอร์ (Tayler series expansions) โดยไม่คิดเทอมลำดับสูงๆ (Higher order terms) จะได้



รูปที่ 2.2 แสดงปริมาณควบคุม $dx.dy.dz$

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \tag{2.3}$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \tag{2.4}$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \tag{2.5}$$

ภายในตัวกลางมีแหล่งพลังงานซึ่งสามารถผลิตอัตราความร้อนได้ เทอมนี้แทนด้วย

$$\dot{E}_g = \dot{q} dxdydz \tag{2.6}$$

โดยที่ $\dot{q}$ คืออัตราพลังงานที่ผลิตขึ้นในตัวกลางต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (W / m^3) นอกจากนี้ยังมีพลังงานซึ่งเก็บไว้โดยวัตถุหรือตัวกลางในปริมาตรควบคุม ซึ่งคือ

$$\dot{E}_{st} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz \tag{2.7}$$

โดยที่ $\rho c_p \partial T / \partial t$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของตัวกลางต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรต่อเวลาที่เปลี่ยนแปลง

เมื่อใช้กฎทรงพลังงานกับปริมาตรควบคุมจะได้

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \tag{2.8}$$

ดังนั้นจะเห็นว่า อัตราการนำความร้อนประกอบด้วยการไหลเข้า ($\dot{E}_{in}$) และไหลออก ($\dot{E}_{out}$) ของพลังงานและแทนสมการ 2.6 และ 2.7 ได้

$$\left(q_x + q_y + q_z\right) + \dot{q} dxdydz - \left(q_{x+dx} - q_{y+dy} - q_{z+dz}\right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz \tag{2.9}$$

แทนด้วยสมการ (2.3 - 2.5) ได้

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \dot{q} dxdydz = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz \tag{2.10}$$

จากกฎของฟูริเยร์ อัตราการนำความร้อนเป็น

$$q_x = -kdydz \frac{\partial T}{\partial x}, q_y = -kdxdz \frac{\partial T}{\partial y}, q_z = -kdxdy \frac{\partial T}{\partial z} \tag{2.11}$$

โดยการแทน 2.11 และ 2.10 และหารตลอดด้วยมิติของปริมาตรควบคุม ($dxdydz$) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{q}=\rho c_p\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (2.12)$$

สมการ 2.12 เป็นรูปทั่วไปของสมการฟุ้งกระจายของความร้อนในพิกัดคาร์ทีเซียน โดยทั่วไปสมการนี้เรียกว่า สมการความร้อน เป็นเครื่องมือพื้นฐานสำหรับวิเคราะห์การนำความร้อน จากคำตอบของสมการ เราจะได้การกระจายอุณหภูมิเป็นฟังก์ชันของเวลา จากสมการความร้อนสามารถกล่าวได้ว่า ที่จุดใดๆ ในตัวกลางอัตราการนำความร้อนสุทธิในปริมาตรหนึ่งหน่วยรวมกับอัตราการผลิตความร้อนเชิงปริมาตรต้องมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนของพลังงานความร้อนที่สะสมไว้ภายในปริมาตรนั้น

สำหรับกรณี ค่า k มีค่าคงที่ จะได้ว่า

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\frac{\dot{q}}{k}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (2.13)$$

โดยที่ $\alpha = k/\rho c_p$ เรียกว่า ค่าการฟุ้งกระจายความร้อน (Thermal diffusivity) ของวัตถุ คุณสมบัติทางเทอร์โมฟิสิกส์ที่สำคัญนี้ก็คือเป็นอัตราส่วนของค่าการนำความร้อนของวัตถุต่อค่าความจุความร้อน ค่า α มาก หมายความว่า วัตถุมีการถ่ายเทความร้อนโดยการนำมากกว่าที่พลังงานที่เก็บเอาไว้มากหรือความร้อนแพร่กระจายตลอดวัตถุอย่างรวดเร็ว มีหน่วยเป็น m^2/s

2.2.1.1 ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity), *k*

ค่าการนำความร้อนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัตถุ นิยามตามความหมายด้วยสมการ 2.1 ค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิต่ำๆ ของแก๊สนั้นไม่สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ ดังนั้นข้อมูลเกี่ยวกับการนำความร้อนส่วนใหญ่ของวัตถุจึงได้มาจากการวัดและการทดสอบ โดยทั่วไปแล้วค่าการนำความร้อนของวัตถุจะแปรค่าไปตามอุณหภูมิ แต่การใช้งานส่วนใหญ่จะใช้ค่าการนำความร้อนคงที่ที่หาจากอุณหภูมิเฉลี่ย ซึ่งก็ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ตารางที่ เป็นตัวอย่างค่าการนำความร้อนของโลหะ อโลหะ ของเหลวและแก๊สบางชนิด

ตารางที่ 2.1 ค่าการนำความร้อน k ของโลหะ อโลหะ ของแข็ง ของเหลว และแก๊สบางชนิด

ชนิดของวัสดุ	ค่าการนำความร้อนที่ 300 K $(W/m\cdot K)$
ทองแดง	386
อะลูมิเนียม	204
เหล็กคาร์บอน	54
แก้ว	0.75
พลาสติก	0.2- 0.3
น้ำ	0.6
เอทิลไกลคอน (Ethyl glycol)	0.2
น้ำมันเครื่อง	0.15
ฟรีออนเหลว	0.07
ไฮโดรเจน	0.18
อากาศ	0.026

กลไกการถ่ายเทความร้อนโดยการนำของแก๊สสามารถอธิบายได้จากทฤษฎีคิเนเมติกว่า เนื่องจากโมเลกุลของแก๊สมีการเคลื่อนที่อิสระ ไม่มีเส้นทางการเคลื่อนที่ที่แน่นอนตายตัว ดังนั้นเมื่อโมเลกุลเหล่านั้นเกิดการชนกันขึ้นก็จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมซึ่งกันและกัน แต่เนื่องจากโมเลกุลที่มีอุณหภูมิสูงนั้นมีพลังงานจลน์มากกว่า ดังนั้นเมื่อโมเลกุลจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าก็จะพาเอาพลังงานจลน์ในบริเวณที่ต่ำกว่านั้นด้วย และเมื่อโมเลกุลที่มีพลังงานจลน์สูงเกิดการชนกันกับโมเลกุลที่มีพลังงานจลน์ต่ำกว่าก็จะมีการถ่ายเทพลังงานเกิดขึ้น กลไกการนำความร้อนทางกายภาพภายในของเหลวก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน แต่เนื่องจากโมเลกุลของของเหลวนั้นมีจำนวนหนาแน่นกว่า และสนามของแรงในของเหลวก็มีบทบาทต่อการถ่ายเทพลังงานมากกว่า ดังนั้นลักษณะการถ่ายเทความร้อนจึงมีความซับซ้อนกว่าแก๊ส จะเห็นได้ว่าค่าการนำความร้อนของแก๊สต่างๆนั้นเกือบจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของความดันเลย ยกเว้นในช่วงที่อยู่ใกล้จุดวิกฤตเท่านั้น โดยการวิเคราะห์จากการแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์อย่างง่ายๆ ปรากฏค่าการนำความร้อนของแก๊สเพิ่มขึ้นตามกำลังสองของอุณหภูมิสัมบูรณ์

ค่าการนำความร้อนของของเหลวเป็นฟังก์ชั่นของอุณหภูมิและจะเห็นได้ว่า ค่าการนำความร้อนของของเหลวต่างๆ ยกเว้นค่าการนำความร้อนของน้ำจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แต่การเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อนนั้นมีค่าน้อยมากจนสามารถถือว่ามีค่าคงที่ที่อุณหภูมิเฉลี่ยค่าหนึ่งของการใช้งานส่วนใหญ่ และไม่ปรากฏว่าค่าการนำความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของความดันเลยพลังงานความร้อนในวัตถุที่เป็นของแข็งนั้นจะถูกเคลื่อนย้ายโดยอิเล็กตรอนอิสระและการสั่นสะเทือนภายใน

โครงสร้างโดยปกติแล้วการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระจะเป็นการเคลื่อนที่ที่มีบทบาทสำคัญ และเนื่องจากภายในตัวนำไฟฟ้าที่ดีนั้นจะมีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นจำนวนมากเคลื่อนที่ไปมาอยู่ภายในโครงสร้างของมัน ดังนั้นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จึงเป็นตัวนำความร้อนที่ดีด้วย ในทำนองเดียวกันวัตถุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ก็จะเป็นฉนวนความร้อนที่ดีด้วยเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามสมรรถนะในการป้องความร้อนของฉนวนจะดีหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการกักอากาศไว้ในรูพรุนของโครงสร้างของวัตถุเหล่านั้น การถ่ายเทความร้อนในวัตถุเหล่านั้นเกิดขึ้นได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การนำความร้อนผ่านโครงสร้างแบบเส้นใยและโครงสร้างที่เป็นรูพรุน การนำและการพาความร้อนผ่านอากาศที่ถูกกักไว้ในโพรงว่างและการแผ่รังสีความร้อนในระหว่างโครงสร้างที่ทึบตันต่างๆ ซึ่งมีบทบาทสำคัญสำหรับในกรณีที่มีอุณหภูมิสูงๆ และในบริเวณที่เป็นสุญญากาศ ปัจจุบันได้มีการพัฒนาฉนวนกันความร้อนแบบพิเศษไว้สำหรับการใช้งานในที่ที่อุณหภูมิต่ำถึง 25 K ชั้นฉนวนพิเศษเหล่านี้ประกอบด้วยชั้นของวัตถุที่สามารถสะท้อนความร้อนได้ดีเป็นจำนวนหลายๆชั้น ฉนวนแต่ละชั้นจะถูกคั่นด้วยช่องว่างที่เป็นสุญญากาศเพื่อให้มีการนำและพาความร้อนน้อยที่สุด ฉนวนพิเศษเหล่านี้จะให้ค่าการนำความร้อนต่ำถึง 0.02 $W/m\cdot K$

2.2.2 การพาความร้อน (Convection Heat Transfer)

เมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุที่เป็นของแข็งหรือไหลผ่านภายในช่องทางการไหล โดยที่อุณหภูมิของของไหลและผิวของแข็งมีค่าแตกต่างกัน การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและผิวของของแข็งจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมพัทธ์กับผิวของของแข็ง กลไกของถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อน ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นโดยแรงภายนอกมาบังคับทำให้ของไหลไหลผ่านบนพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากแรงลอยตัว ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในของไหล การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) การคำนวณหาการกระจายอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน ในทางปฏิบัติเป็นเรื่องที่มีความซับซ้อนมาก เพื่อให้การคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนง่ายขึ้นระหว่างผิวที่ร้อน T_w และอุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลผ่านบนผิวที่อุณหภูมิ T_f ตามที่แสดงในรูปที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ถูกกำหนดเป็น

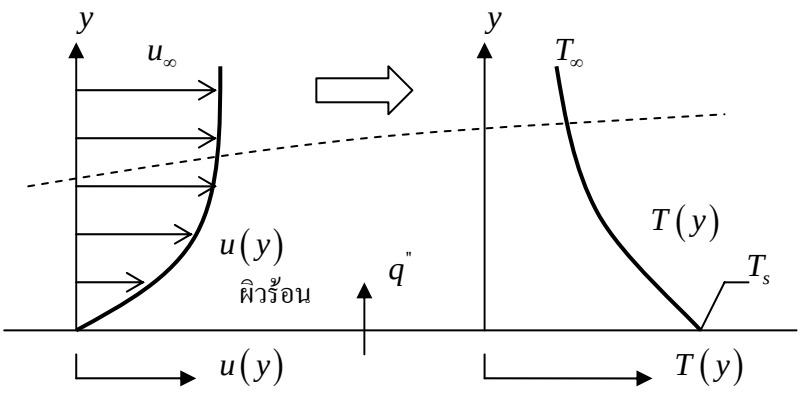
$$q'' = h[T_w - T_f] \tag{2.14}$$

โดยที่ q'' เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากผนังร้อนไปยังของไหลที่เย็น มีหน่วยเป็น (W/m^2) ถ้าการถ่ายเทความร้อนเกิดจากของไหลที่ร้อนไปยังผนังเย็น จะได้ว่า

$$q'' = h\left(T_f - T_w\right) \tag{2.15}$$

โดยที่ q'' เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากของไหลที่ร้อนไปยังผนังเย็น สมการ 2.15 เป็นสมการที่ได้มาจากกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) โดยที่อุณหภูมิมีหน่วยเป็นเซลเซียสหรือเคลวิน และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h มีหน่วยเป็น $W/\left(m^2 \cdot {}^\circ C\right)$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h (Convection heat transfer coefficient) จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของการไหล เช่น การไหลแบบลามินาร์หรือการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ รูปทรงของวัตถุ พื้นที่ที่ของไหลไหลผ่าน คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของของไหล อุณหภูมิเฉลี่ย และตำหน่งต่างๆ ตามพื้นที่ผิวของวัตถุ นอกจากนี้ยังขึ้นกับกลไกของการถ่ายเทความร้อนว่าเป็นการพาความร้อนแบบบังคับหรือเป็นการพาความร้อนแบบอิสระ ค่าของ h จะแปรเปลี่ยนไปตามตำแหน่งต่างๆ ตามพื้นผิววัตถุ ดังนั้นเพื่อความสะดวกจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยตลอดพื้นผิว แทนค่า h ที่ตำแหน่งนั้นๆ ในการพิจารณาการพาความร้อนตลอดทั้งพื้นผิว h_m สมการและ ค่า h จึงถูกแทนด้วยค่า h_m ดังนั้นค่า q'' จึงเป็นค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยตลอดบริเวณที่พิจารณา



รูปที่ 2.3 การพัฒนาชั้นของขอบเขตในการพาความร้อน

ตารางที่ 2.2 ค่าโดยประมาณของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย

ประเภทของการพาความร้อนและชนิดของของไหล	$\overline{h}_c \left(W/m \cdot K \right)$
การพาความร้อนแบบอิสระ, อากาศ	5-25
การพาความร้อนแบบอิสระ, น้ำ	20-100
การพาความร้อนแบบบังคับ, อากาศ	10-200
การพาความร้อนแบบบังคับ, น้ำ	50-10,000
น้ำที่กำลังเดือด	3,000-100,000
ไอน้ำที่กำลังกลั่นตัว	5,000-100,000

2.2.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer)

ความร้อนจากการนำและการพาจะเคลื่อนที่ผ่านได้เฉพาะในกรณีที่มีวัตถุมาเป็นตัวกลางเท่านั้น สำหรับความร้อนจากการแผ่รังสีนั้นจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้โดยไม่จำเป็นต้องมีตัวกลางเลย เช่น ในบริเวณที่มีสุญญากาศ เป็นต้น พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีนั้นจะเคลื่อนที่ไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเร็วเท่ากับความเร็วแสง ซึ่งมีความเร็วเท่ากับ $3 \text{x} 10^8 \quad cm/s$ พลังงานที่เคลื่อนที่ไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีอยู่มากมายหลายชนิด เช่น รังสีเอ็กซ์ รังสีอินฟาเรด แต่สำหรับในที่นี้จะพิจารณาแต่เพียงพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีเท่านั้น

จำนวนพลังงานที่ส่งออกจากผิววัตถุในรูปรังสีความร้อน นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์และลักษณะผิว วัตถุที่สามารถแผ่รังสีได้สูงสุดหรือที่เรียกว่า วัตถุดำ นั้นจะมีอัตราการแผ่รังสีความร้อนเป็น

$$q_r = \sigma A T^4 \tag{2.16}$$

เมื่อ q_r = อัตราความร้อนจากการแผ่รังสี มีหน่วยเป็น W

A = พื้นที่ของตัวแผ่รังสีความร้อน มีหน่วยเป็น m^2

T = อุณหภูมิผิวของตัวแผ่รังสีความร้อน มีหน่วยเป็น K

σ = ค่าคงที่สเตฟาน- โบลทมันน์ (Stefan- Boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ 5.67 x 10^{-8} $W/m \cdot K$

จะเห็นได้จากสมการ 2.16 อัตราความร้อนจากการแผ่รังสีของวัตถุดำนี้แปรโดยตรงกับกำลังสี่ของอุณหภูมิสัมบูรณ์ และทั้งๆที่อัตราการแผ่รังสีความร้อนไม่ขึ้นอยู่กับสภาพของสิ่งแวดล้อม ก็ปรากฏว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิของการแผ่รังสีจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวัตถุ 2 ชิ้นหรือมากกว่า 2 ชิ้นที่กำลังแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งกันและกัน ถ้าวัตถุดำแผ่รังสีความร้อนไปยังวัตถุที่อยู่รอบๆ และวัตถุที่อยู่รอบๆก็เป็นวัตถุดำ(สามารถดูดซึมพลังงานจากการแผ่

รังสีที่มาตกกระทบได้หมด) ด้วยแล้ว อัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิจากการแผ่รังสีของวัตถุดำที่มีอุณหภูมิไปยังวัตถุดำที่อยู่รอบๆซึ่งมีอุณหภูมิเป็น T_2 จะมีค่าเป็น

$$q_r = \sigma A_1 \left(T_1^4 - T_2^4 \right) \tag{2.17}$$

เมื่อ T_1 = อุณหภูมิผิวของวัตถุดำ; K

T_2 = อุณหภูมิผิวของวัตถุที่อยู่รอบๆ (เป็นวัตถุดำด้วย); K

วัตถุจริงจะไม่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้มากเท่ากับตัวแผ่รังสีในจินตนาการที่เรียกว่าวัตถุดำ แต่จะแผ่รังสีได้น้อยกว่า ถ้าหากที่อุณหภูมิเท่าๆกันนั้นวัตถุจริงจะสามารถแผ่รังสีความร้อนในอัตราส่วนที่คงที่กับวัตถุดำได้ทุกความยาวคลื่นแล้ว วัตถุจริงนั้นจะมีชื่อเรียกว่า วัตถุเทา ซึ่งจะแผ่รังสีความร้อนในอัตรา

$$q_r = \sigma \varepsilon A T^4 \tag{2.18}$$

ส่วนอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิจากการแผ่รังสีของวัตถุเทาที่อุณหภูมิ ไปยังวัตถุดำที่อยู่รอบๆและมีอุณหภูมิเป็น จะมีค่าเป็น

$$q_r = \sigma A_1 \varepsilon_1 \left(T_1^4 - T_2^4 \right) \tag{2.19}$$

เมื่อ ε_1 ค่าการแผ่รังสีของวัตถุเทา มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของความร้อนจากการแผ่รังสีของวัตถุเทากับวัตถุดำเมื่อมีอุณหภูมิเท่าๆกัน

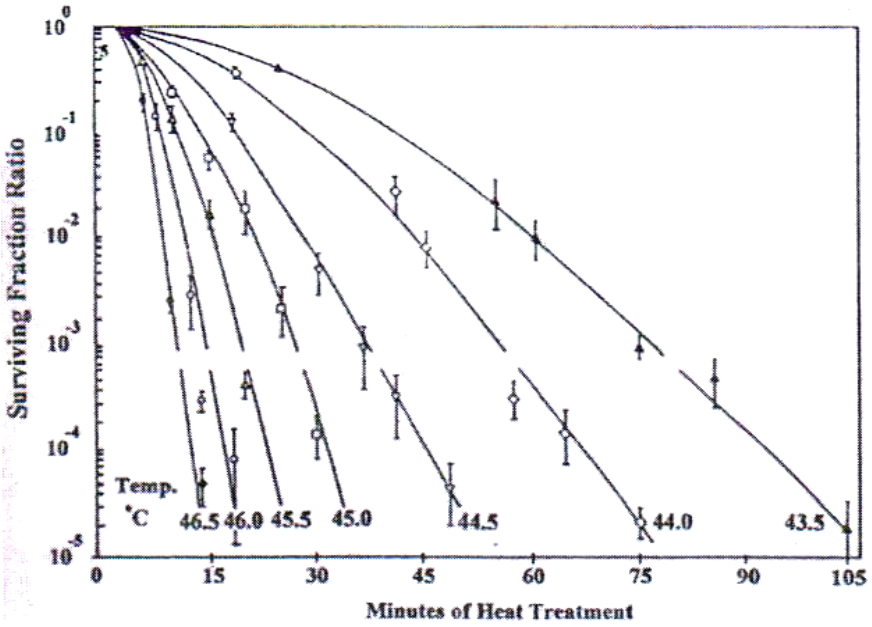
สำหรับกรณีที่วัตถุทั้งสองต่างไม่ใช่วัตถุที่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้สูงสุดดังที่มีชื่อว่าวัตถุดำ และถ้าวัตถุทั้งสองต่างก็มีความสัมพันธ์ทางด้านรูปร่างซึ่งกันและกันแล้ว อัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิจากการแผ่รังสีระหว่างวัตถุทั้งสองจะมีค่าเป็น

$$q_r = \sigma A_1 \Im_{1-2} \left(T_1^4 - T_2^4 \right) \tag{2.20}$$

เมื่อ $\Im_{1-2}$ = โมดูลัสที่ใช้ดัดแปลงสมการการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุดำเพื่อใช้หาอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างวัตถุจริงที่คิดค่าการแพร่รังสีและความสัมพันธ์ทางด้านรูปร่างรวมเข้าไปด้วย

2.3 พื้นฐานการกระจายความร้อนภายในเนื้อเยื่อ

การใช้ความร้อนรักษาโรคเป็นการรักษาที่ทำให้อุณหภูมิ ณ บริเวณนั้น สูงขึ้นอยู่ในช่วง 41-45 องศาเซลเซียส [24], [25] เซลล์ที่อยู่บริเวณนั้นๆ จะถูกผลกระทบและมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอุณหภูมิการใช้ความร้อนในการรักษามะเร็ง ได้มีการพัฒนาเทคนิคที่เรียกว่า Hyperthermia cancer therapy ซึ่งมีการใช้มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 การรักษาโรคมะเร็งโดยใช้ความร้อนเป็นการรักษามะเร็งรูปแบบใหม่ ซึ่งมีพื้นฐาน และหลักการทางชีววิทยาที่สามารถพิสูจน์ ทดลอง และอธิบายได้ ซึ่งปัจจุบันการรักษาโรคมะเร็ง โดยใช้ความร้อนนี้สามารถรักษาโรคมะเร็งชนิดต่างๆได้ทั่วร่างกาย และได้ผลการรักษาที่น่าสนใจ การรักษามะเร็งด้วยความร้อนอาศัยหลักการให้ความร้อนกับเซลล์มะเร็งอยู่ในช่วง 41-50 องศาเซลเซียสและการรักษาระดับของอุณหภูมิไว้ให้คงที่ พื้นฐานของปรากฏการณ์ทางชีววิทยาสำหรับการรักษาโรคมะเร็งด้วยความร้อน จะมีอยู่สองปริมาณที่มีความสำคัญในการรักษาคือ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน ซึ่งตามรูปที่ จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ส่งผลต่อปริมาณเซลล์มะเร็งที่รอดตาย จากรูปที่ 2.4 เมื่อให้อุณหภูมิสูงแก่เซลล์มะเร็ง ในช่วงเวลาเริ่มต้นเซลล์มะเร็งจะสูญเสียเป็นจำนวนมาก แต่เมื่อมีการลดอุณหภูมิที่ให้แก่เซลล์มะเร็ง ผลกระทบที่เกิดขึ้นคือ ต้องใช้เวลามากขึ้นเพื่อทำให้เซลล์มะเร็งมะเร็งตาย ในการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงๆแก่เซลล์ จำนวนเซลล์จะเกิดการสูญเสียมากและทำให้เซลล์ปกติที่อยู่รอบๆ เซลล์มะเร็งได้รับความเสียหายได้เช่นกัน ดังนั้นในการเพิ่มอุณหภูมิให้เหมาะสมนั้น สามารถทำลายเซลล์มะเร็งได้จำนวนมากและไม่เป็นอันตรายแก่เซลล์ปกติ



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์มะเร็ง [26]

2.4 สมการความร้อนทางชีววิทยา (Bioheat Equation)

ในรูปแบบสมการการกระจายตัวของความร้อน [9], [10] ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายความร้อน ภายในเนื้อเยื่อช่วงคลื่นความถี่วิทยุ ภายในสมการได้พิจารณาถึงกระแสที่ไหลผ่านภายในเนื้อเยื่อ พลังงานที่ถูกเก็บสะสมในรูปแบบของความร้อน การกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าทีไหลผ่านจากตัวอิเล็กโทรดลงสู่เนื้อเยื่อตับ การกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าและการเก็บสะสมพลังงานในช่วงความถี่วิทยุ การแปรพลังงานที่สะสมเป็นรูปแบบของความร้อนที่กระจายตัวออกไปรอบๆเนื้อเยื่อ ซึ่งรูปแบบของสมการที่ครอบคลุมตัวแปรต่างๆเกิดขึ้นในเนื้อเยื่อตับ ดังนี้

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k \nabla T + J \cdot E - h_{bl}\left(T - T_{bl}\right) + Q_m \tag{2.21}$$

$$h_{bl} = \rho_{bl} c_{bl} \omega_{bl} \tag{2.22}$$

โดยที่

ρ = ความหนาแน่นจำเพาะ (kg/m^3)

c = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (J/kg·K)

k = ค่าการนำความร้อน (W/m·K)

J = ค่าความหนาแน่นของกระแส (A/m^2)

E = ความเข้มของสนามไฟฟ้า (V/m)

T_{bl} = อุณหภูมิของเลือด (โดยกำหนดให้มีอุณหภูมิที่ 37C)

ρ_{bl} = ความหนาแน่นจำเพาะของเลือด (kg/m^3)

c_{bl} = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเลือด (J/kg·K)

ω_{bl} = อัตราการไหลของเลือด (1/s)

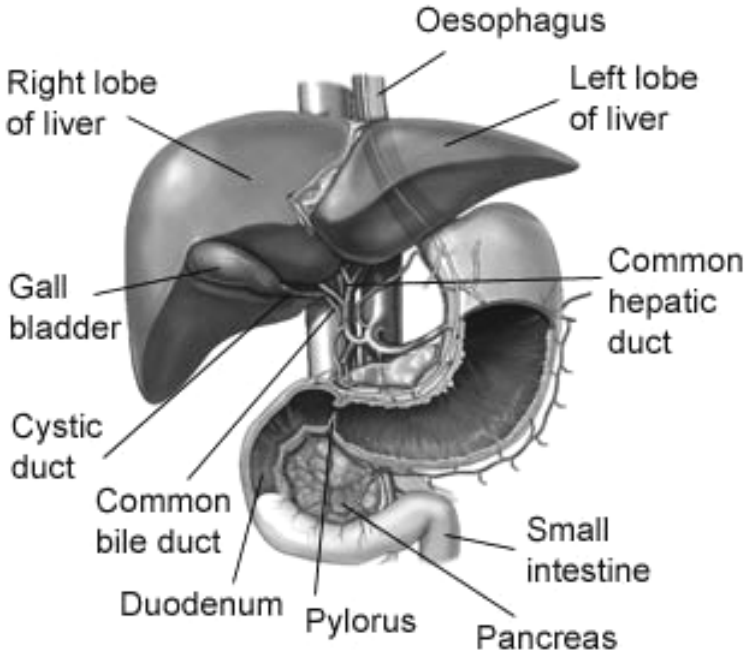
h_{bl} = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเลือดที่ไหลเวียน

Q_m = พลังงานที่เกิดจากการกระบวนการเมตาบอลิซึม (W/m^3)

จากสมการความร้อนทางชีววิทยา ที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้ละทิ้งค่าตัวแปร ในส่วนของพลังงานที่เกิดขึ้นโดยกระบวนการเมตาบอลิซึมของเลือด(Q_m) ซึ่งค่าตัวแปรนี้ถือว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณ $J \cdot E$

2.5 ลักษณะทางกายวิภาคเบื้องต้นของตับ

ตับโดยปกติในผู้ใหญ่จะมีน้ำหนักราว 1.3 ถึง 3.0 กิโลกรัม ในขณะมีชีวิต ตับมีสีน้ำตาลแกมแดง มีลักษณะนุ่มและฉีกขาดง่าย ตับเป็นอวัยวะที่มีขนาดใหญ่ที่สุดเป็นอันดับสอง รองจากผิวหนัง และเป็นต่อมที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในร่างกาย ตับจะมีรูปร่างคล้ายลิ่มขนาดใหญ่ แต่ด้านบนด้านหน้า และด้านหลังกลมมน ตับจะวางตัวอยู่ทางด้านขวาบนของช่องท้องและอยู่ใต้กระบังลม นอกจากนี้บางส่วนของตับยังวางอยู่บนกระเพาะอาหาร ปลายทางด้านซ้ายสุดของตับจะชี้ไปทางม้าม และบนพื้นผิวด้านหน้าของตับยังมีถุงน้ำดีวางตัวอยู่อีกด้วย พื้นผิวของตับเกือบทั้งหมดจะถูกคลุมด้วยเยื่อบุช่องท้อง ซึ่งเป็นเยื่อบุสองชั้นที่คลุมอยู่บนอวัยวะต่างๆทางด้านหน้าของช่องท้องเพื่อลดการเสียดสีระหว่างอวัยวะ ส่วนใหญ่ของตับอยู่ทางขวา วัดจากหน้าไปหลังยาว 12.5 เซนติเมตร และจะลดเหลือครึ่งเดียวในแนวกลางตัว

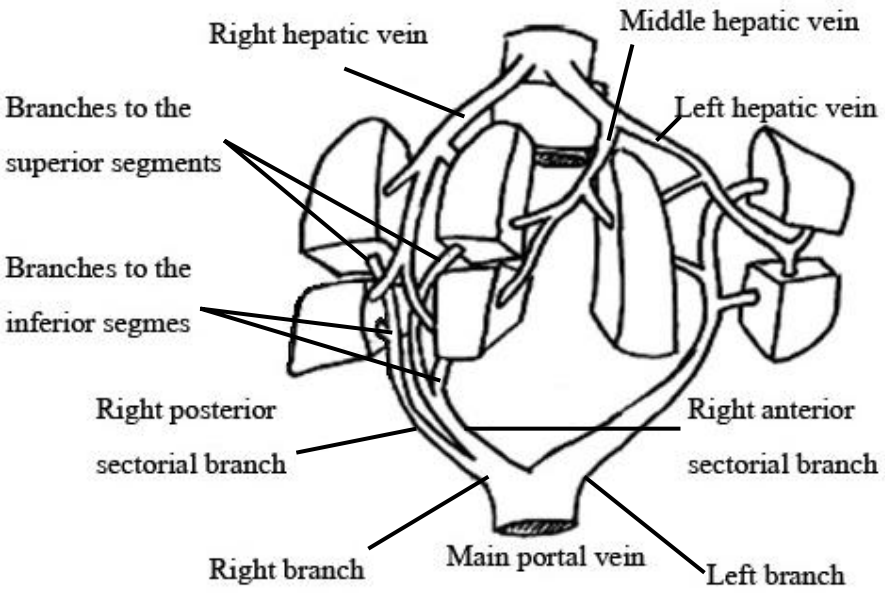


รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะกายวิภาคของตับ

2.5.1 การไหลเวียนเลือดในตับ (Hepatic circulation)

การไหลเวียนเลือดในส่วนของตับนั้นค่อนข้างจะแตกต่างจากการไหลเวียนเลือดในส่วนอื่นๆ กล่าวคือตับจะรับเลือดแดงจากหลอดเลือดแดงเฮปพาทิกประมาณ 30-40 % ของเลือดทั้งหมดที่ผ่านเข้ามาในตับ และจะรับเลือดอีกส่วนหนึ่งประมาณ 60-70 % จากหลอดเลือดดำพอร์ตัล ความดันเลือดในหลอดเลือดแดงเฮปพาติกมีค่าประมาณ 90 มิลลิเมตรปรอทแต่เมื่อเลือดเข้ามาอยู่ในหลอดเลือดฝอยไซนูซอยด์ (Sinusoids) ภายในตับแล้วจึงมีความดันเพียง 10-13 มิลลิเมตรปรอท

ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มความดันเลือดในหลอดเลือดดำใหญ่เข้าสู่หัวใจ (Inferior vena cava) ก็จะทำให้มีความดันเลือดในหลอดเลือดดำพอร์ตัลสูงขึ้น จนทำให้มีเลือดคั่งอยู่ในตับและทำให้เกิดการซึมออกของ plasma ลงในช่องท้องได้



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะทางกายภาพของเส้นเลือดต่างๆภายในตับ

2.5.2 หน้าที่การทำงานของตับ

ตับเป็นอวัยวะที่สำคัญมากอันหนึ่งของร่างกายทำหน้าที่มากกว่าอวัยวะอื่นๆหลายอวัยวะ นอกจากมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการย่อยอาหารแล้วตับยังมีหน้าที่อื่นๆ อีกดังนี้

1. สร้างน้ำดีซึ่งหน้าที่เป็นน้ำย่อยอาหารและเป็นตัวขับถ่ายสารจำพวกคลอเลสตอรอล
2. สะสมคาร์โบไฮเดรต ไว้ในรูปของไกลโคเจน (glycogen) และเมื่อร่างกายต้องการจะปล่อยเข้ากระแสเลือดในรูปของกลูโคส
3. สร้างโปตีนที่พบในพลาสมาเป็นต้นว่า Albumin, Heparin และ Fibrinogen ซึ่งจำเป็นสำหรับทำให้เลือดแข็งตัว
4. สังเคราะห์ Prothrombin โดยอาศัยวิตามินเคช่วย
5. สังเคราะห์กรดอะมิโนจากสารประกอบง่ายๆ
6. เคลื่อนย้ายหมู่อะมิโนออกจากกรดอะมิโน
7. เป็นแหล่งสร้างเม็ดเลือดแดงในทารกขณะอยู่ในครรภ์ เมื่อทารกคลอดหน้าที่นี้จะหยุดไป
8. สลายฮีโมโกลบินของเม็ดเลือดแดงออกเป็น Globin และ Heme จากนั้น Kuppfer's cell ในตับจะสลาย Heme ออกเป็น Biliverdin และธาตุเหล็ก

9. เป็นที่เก็บสะสมวิตามินบี12 ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการสร้างเม็ดเลือดแดงเพื่อป้องกันโรคโลหิตจาง

10. เป็นที่เก็บสะสมวิตามินเอและวิตามินดี

11. เก็บสะสมธาตุเหล็กและทองแดง

12. ทำลายสิ่งที่เป็นพิษ (Detoxification) ต่อร่างกาย กำจัดแอมโมเนียในเลือดโดยเปลี่ยนให้เป็นยูเรียซึ่งมีพิษน้อย

13. เป็นศูนย์กลางเมตาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรตและไขมัน

2.6 โรคมะเร็ง

มะเร็งเป็นโรคร้ายชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นได้ทั้งในสัตว์และมนุษย์ทุกชนชาติทุกภาษา ทุกเพศ ทุกวัย และทุกฐานะ มนุษย์ไม่ว่าจะอยู่ในป่าหรือในเมืองของทุกประเทศ ทุกทวีปในส่วนต่างๆของโลกมีโอกาสเป็นมะเร็งได้เหมือนกัน ผิดกันแต่ตำแหน่งของอวัยวะที่เป็นเท่านั้น ซึ่งเป็นมากน้อยต่างกัน โรคมะเร็งกำลังเป็นปัญหาทางสาธารณสุขที่สำคัญของทุกประเทศทั่วโลก ไม่ว่าจะเป็นประเทศที่พัฒนาแล้ว หรือประเทศที่กำลังพัฒนา ในมโนภาพของบุคคลทั่วๆไป โรคมะเร็งเป็นโรคที่น่ากลัวรักษาให้หายขาดได้ยาก และเมื่อเป็นแล้วส่วนใหญ่จะต้องเสียชีวิตทุกรายด้วยความทุกข์ทรมาน ความจริงแล้วโรคมะเร็งส่วนใหญ่จะสามารถรักษาให้หายขาดได้ ถ้าได้รับการรักษาด้วยวิธีการที่ถูกต้องตั้งแต่ในระยะที่เพิ่งเริ่มเป็น

มะเร็งคือ ก้อน ตุ่มไต ที่ผิดปกติที่ปรากฏภายในหรือบริเวณผิวหนังของร่างกาย เรียกรวมๆกันว่า เนื้องอก(Neoplasm, Neoplasia, New growth, Tumor) เนื้องอกนี้เกิดขึ้นมาใหม่จากเนื้อเยื่อของร่างกาย อยู่นอกเหนือการควบคุมของร่างกาย และไม่มีประโยชน์หรือมีโทษต่อร่างกาย เนื้องอกแบ่งออกเป็น 2ชนิด

1. เนื้องอกชนิดธรรมดา (Benign tumor) โดยปกติจะมีผลต่อร่างกายน้อยมาก นอกจากเกิดในอวัยวะที่มีเนื้อที่จำกัด เช่น ภายในสมอง ทำให้เกิดการกดดันต่อเนื้อสมองปกติโดยรอบอย่างมาก ทำให้เสียชีวิตได้ หรืออาจเกิดภาวะแทรกซ้อน เช่น ก้อนเนื้องอกที่มีก้านอาจบิดตัว ทำให้เกิดความเจ็บปวด เกิดการเน่าตายของก้อนเนื้องอก มีเลือดออก หรือมีการติดเชื้อได้ และต่อมาเนื้องอกที่มีการสร้างฮอร์โมน เช่น เนื้องอกของต่อมใต้สมอง ต่อมหมวกไต ตับอ่อน เป็นต้น ทำให้ร่างกายมีการผิดปกติในระบบฮอร์โมนเป็นอย่างมาก

2. เนื้องอกชนิดร้าย (Malignant tumor) หรือที่เรียกกันทั่วๆไปว่ามะเร็ง(Cancer) นั่นเอง มะเร็งอาจจะเกิดในลักษณะที่เป็นก้อนมะเร็ง หรืออาจจะเกิดในลักษณะที่เซลล์มะเร็งกระจายไปทั่วระบบอวัยวะนั้นๆ อาทิ เช่นมะเร็งเม็ดเลือดขาว เซลล์มะเร็งจะกระจายไปทั่วระบบการไหลเวียนเลือดเป็นต้น ฉะนั้น มะเร็งคือ เนื้องอกชนิดร้ายที่เกิดขึ้นมาใหม่จากเนื้อเยื่อปกติของร่างกาย มีการเจริญเติบโตอยู่นอกเหนือการควบคุมร่างกาย และมีโทษต่อร่างกาย เซลล์มะเร็งจะมีการแบ่งตัว

อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดเป็นก้อนหรือเป็นแผลมะเร็งขนาดใหญ่ ลักษณะการโตของก้อนมะเร็งจะเป็นแบบแทรกซึม หรือมีส่วนยื่นเข้าไปในเนื้อเยื่อปกติโดยรอบ การแทรกซึมเช่นนี้ จึงมีการทำลายหลอดเลือดทำให้มีเลือดออก หรือจากการที่ก้อนมะเร็งโตเร็วมาก จนขาดเลือดไปหล่อเลี้ยง จึงเกิดการเน่าตายของเซลล์มะเร็ง และมีลักษณะที่สำคัญของมะเร็งคือ เซลล์มะเร็งจากมะเร็งปฐมภูมิสามารถแพร่กระจายไปได้ทั่วร่างกาย ไปเกิดขึ้นใหม่เป็นมะเร็งทุติยภูมิตรงส่วนอื่นของร่างกายที่อยู่ห่างไกลออกไป มะเร็งแต่ละชนิดจะมีความรุนแรงแตกต่างกันและยังขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์เฉพาะระหว่างมะเร็งนั้นกับตัวผู้ป่วยโดยตรง ความรุนแรงจึงแตกต่างกันในแต่ละบุคคล แต่ละก้อนมะเร็งในคนเดียวกันหรือแม้แต่มะเร็งก้อนเดียวกันยังมีอัตราการเจริญเติบโตไม่เท่ากัน มะเร็งบางชนิดมีการแพร่กระจายได้รวดเร็วมาก แม้ว่าจะเพิ่งเริ่มเป็น มะเร็งแต่ละชนิดชอบแพร่กระจายไปเฉพาะอวัยวะบางอวัยวะเท่านั้น เช่น มะเร็งเต้านม ชอบแพร่กระจายไปที่กระดูกหรือตับมากกว่าอวัยวะอื่น เป็นต้น

2.6.1 การแพร่กระจายของมะเร็ง

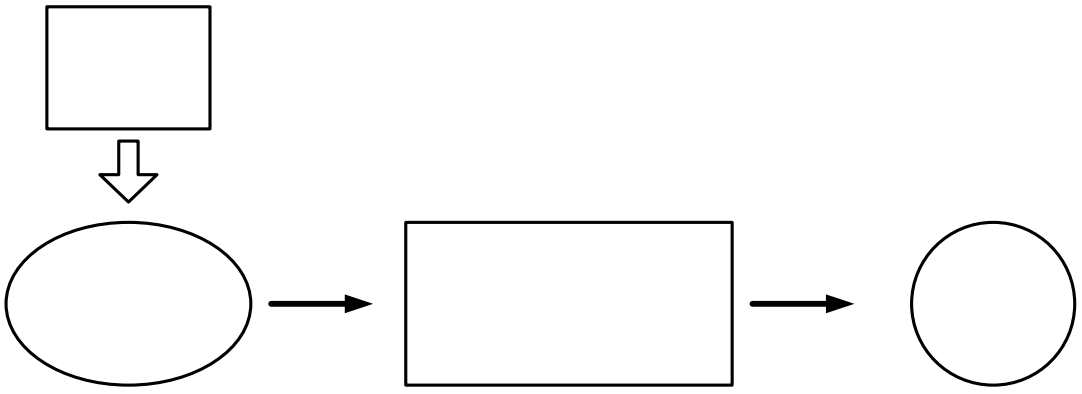
นอกจากก้อนมะเร็งจะมีการเติบโตแทรกซึมเข้าไปในเนื้อเยื่อปกติโดยรอบแล้ว ยังมีการแพร่กระจายไปได้ไกลๆ เพราะเซลล์มะเร็งมักจะหลุดออกจากกันได้ง่าย เนื่องจากที่ผนังของเซลล์มะเร็งจะมีแคลเซียมไอออนน้อยกว่า และมีประจุไฟฟ้ามากกว่าที่ผนังของเซลล์ปกติ นอกจากนี้ ยังพบว่าในก้อนมะเร็งยังมีน้ำย่อยที่จะละลายเนื้อเยื่อต่างๆ เช่น น้ำย่อยโปรตีน (Protease) น้ำย่อยสารไฮอะลิน (Hyaluronidase) และน้ำย่อยอะมิโนเปปไทด์ (Amino peptidase) เซลล์มะเร็งมักจะมีรูปทรงกลมต่างจากเซลล์ปกติ ซึ่งมักจะเป็นรูปแบน ดังนั้นเซลล์มะเร็งจึงมีส่วนสัมผัสและการยึดเหนี่ยวระหว่างเซลล์น้อย

ทฤษฎีของการแพร่กระจายมะเร็ง ในปัจจุบันนี้มีทฤษฎีที่เชื่อกันมาก 3 ทฤษฎีคือ

1. ทฤษฎีทางกลศาสตร์ (Mechanical theory) โดยเซลล์จะหลุดออกจากกันได้ง่าย แล้วแทรกตัวเข้าผนังของหลอดเลือดหรือหลอดน้ำเหลือง (Diapedesis) เหมือนเม็ดเลือดขาว หรือจากการแตกของหลอดเลือด ทำให้เซลล์มะเร็งเข้าไปในกระแสเลือดหรือกระแสน้ำเหลืองได้
2. ทฤษฎีของการเลือกเฉพาะ (Selective affinity theory) ลักษณะของอวัยวะที่แพร่กระจายจะมีความสำคัญและควบคุมลักษณะของการแพร่กระจาย อวัยวะบางอย่างเหมาะที่จะเป็นตำแหน่งที่แพร่กระจายของมะเร็งบางชนิด
3. ทฤษฎีการเปลี่ยนรูป (Transformation theory) คือ ดีเอ็นเอจีโนม (DNA genome) จะเข้าไปในเซลล์ปกติ และร่วมกับมีความบกพร่องในระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย ทำให้เซลล์ปกติเปลี่ยนเป็นเซลล์มะเร็ง

2.6.2 ขั้นตอนการเกิดมะเร็ง

โดยสรุปแล้ว การเกิดมะเร็งมีปัจจัยหลายอย่างรวมๆกัน ขั้นตอนการเกิดมะเร็งแบ่งออกเป็น 3 ระยะ ซึ่งถ้านับระยะเวลาตั้งแต่เซลล์ปกติได้รับสารก่อมะเร็งจนกระทั่งเห็นเป็นก้อนมะเร็งจะใช้เวลานานเป็นปีหรือหลายปี เมื่อเกิดเป็นเซลล์มะเร็งขึ้นแล้ว เนื่องจากเซลล์มะเร็งมีความพิการหรือมีการผิดปกติที่ยีน หรือโครโมโซม ฉะนั้น เซลล์มะเร็งจะแบ่งตัวอย่างรวดเร็วและให้เซลล์ลูกที่เป็นเซลล์มะเร็งเสมอ จะไม่แบ่งตัวให้เซลล์ลูกที่เป็นเซลล์ปกติ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเซลล์มะเร็ง มีคุณสมบัติของการถ่ายทอดตรง (Breed-true property) เซลล์มะเร็งมีการเจริญเติบโตโดยมีวงชีพของเซลล์เหมือนเซลล์ปกติ คือเมื่อเซลล์แบ่งตัวให้เป็นเซลล์ลูก 2 เซลล์แล้ว บางเซลล์อาจอยู่นอกวงชีพของเซลล์เรียกว่า ระยะจี0 (G_0) ซึ่งเป็นเซลล์ที่ไม่มีการเจริญเติบโต แต่ไม่ตายและอาจกลับเข้าสู่วงชีพของเซลล์ได้ถ้ามีสิ่งกระตุ้น เซลล์ส่วนใหญ่จะเข้าสู่ระยะจี 1 (G_1, Presynthetic หรือ postmitotic)เป็นระยะที่เซลล์เริ่มแสดงลักษณะเฉพาะของมัน และในตอนท้ายๆของระยะนี้จะมีการเตรียมการสร้างดีเอ็นเอโดยการสร้างน้ำย่อยต่างๆ ถัดไปเป็นระยะเอส (S, Synthetic phase) คือมีการสร้างดีเอ็นเอ จากนั้นจะเข้าสู่ระยะจี2 (G_2, Postsynthetic หรือ permitotic phase) ซึ่งไม่มีการสร้างดีเอ็นเออีก แต่มีการสร้างโปรตีนเพิ่มเพื่อนำไปสร้างอาร์เอ็นเอ และสุดท้ายเซลล์จะเข้าสู่ระยะเอ็ม (M) คือระยะการแบ่งตัว (Mitotic phase) เซลล์มะเร็งจะสร้างดีเอ็นเอช้ากว่าหรือใกล้เคียงกับเซลล์ปกติแต่เซลล์มะเร็งตายยากกว่า เพราะเซลล์ค้างอยู่ในระยะใดระยะหนึ่งของวงชีพของเซลล์ ส่วนใหญ่ที่พบคือในระยะจี 1 และจี 0 การที่เซลล์มะเร็งมักมีอัตราการแบ่งตัวเร็วกว่าเซลล์ปกติ จึงเป็นผลให้เซลล์มะเร็งรวมตัวกันโตเป็นก้อน



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงขั้นตอนของการเกิดมะเร็ง

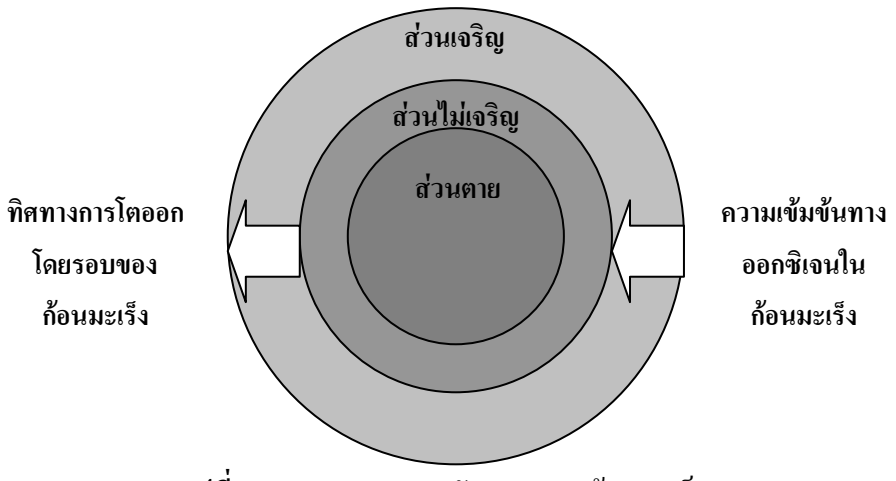
การศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของเซลล์มะเร็งโดยเฉพาะเป็นก้อน อาจทำง่ายๆโดยการวัดระยะเวลาที่เซลล์มะเร็งแบ่งตัวจนปริมาตรของก้อนมะเร็งเป็น2 เท่า ความแตกต่างในการเจริญเติบโตของแต่ละก้อนมะเร็งในผู้ป่วยรายเดียวกัน หรือต่างคนกัน หรือแม้แต่ในก้อนมะเร็งก้อนเดียวกันยังมีการเจริญเติบโตเร็วช้าต่างกัน มีมะเร็งบางชนิดในคนที่ก้อนโตช้ามากๆทั้งที่เซลล์มีอัตราการแบ่งตัวเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น เซลล์กลับไปอยู่นอกวงชีพ ทำให้ไม่มีการแบ่งตัว หรือมีการหลุดลอกออกไป หรือมีการตายของเซลล์ เช่น แก่ตาย ถูกเบียดตาย ขาดอาหารหรือขาดออกซิเจน หรือถูกทำลายโดยระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายโดยเม็ดเลือดบางชนิด ก้อนมะเร็งแต่ละก้อนจะมีหลอดเลือดมาเลี้ยงโดยเฉพาะ จึงมีผู้เชื่อกันว่าการโตของก้อนมะเร็งจะถูกควบคุมโดยสารชนิดหนึ่งที่เรียกว่า สารกระตุ้นการเจริญของเซลล์บุผนังด้านในของหลอดเลือดฝอย (Tumour angiogenesis factor-TAF) การมีหลอดเลือดฝอยใหม่ๆ เกิดได้เร็ว ก็จะทำให้ก้อนมะเร็งโตขึ้นเร็วด้วย ก้อนมะเร็งอาจแบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ

1. ส่วนเจริญ เป็นส่วนรอบนอกของก้อนเซลล์ได้รับอาหารและออกซิเจนจากหลอดเลือดอย่างสมบูรณ์แบ่งตัวได้เร็ว

2. ส่วนที่ไม่เจริญอยู่ลึกถัดเข้ามา เป็นเซลล์ที่ยังมีชีวิตแต่ไม่แบ่งตัว ส่วนใหญ่อยู่ในระยะจี 1

3. ส่วนที่แกนหรือส่วนตาย อยู่ตรงกลางของก้อนมะเร็ง ประกอบด้วยเซลล์ที่ตายแล้ว เพราะขาดออกซิเจน หรือถูกเบียดตาย แต่เซลล์ชั้นนอกๆของส่วนนี้อาจจะไม่ตายแต่ไม่แบ่งตัว และส่วนใหญ่อยู่ในระยะจี 0 เพราะเซลล์สามารถได้กำลังงานจากการสลายตัวของไกลโคเจนในเซลล์เมื่ออยู่ในภาวะที่ขาดออกซิเจนเหมือนบัคเตเรียบางชนิด

เนื่องจากออกซิเจนจากหลอดเลือดฝอยจะมีการซึมซาบได้ในระยะจำกัด และถ้าเซลล์อยู่ห่างจากหลอดเลือดฝอยเกินกว่าระยะทาง 150 ไมโครมิเตอร์ จะถือว่าเซลล์นั้นอยู่ในภาวะขาดออกซิเจน ฉะนั้น เมื่อก้อนมะเร็งมีขนาดโตขึ้น ส่วนแกนหรือส่วนตายจะมีขนาดโตขึ้นด้วย ในขณะที่ส่วนเจริญและส่วนไม่เจริญมักจะมีขนาดคงที่



รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงลักษณะของก้อนมะเร็ง

2.7 หลักการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

ในปัจจุบันผู้ที่ป่วยเป็นมะเร็ง ที่เกิดขึ้นในตับ มีอัตราการตายมากกว่า 1 ล้านคนต่อปีทั่วโลก วิธีการในรักษาในปัจจุบันก็มีอยู่หลายๆวิธี ซึ่งวิธีการรักษามะเร็งตับที่ใช้กันอยู่ในอดีตถึงปัจจุบันก็จะมีดังนี้คือ

1. การผ่าตัด เป็นวิธีการรักษาที่สามารถทำให้ผู้ป่วยหายขาดได้แน่นอนกว่าวิธีอื่น และถือว่าการผ่าตัดเอาก้อนมะเร็งออกเป็นวิธีที่ดีที่สุด แต่ก็มีผู้ป่วยจำนวนหนึ่งประมาณ 20-70% ที่ไม่สามารถเข้ารับการผ่าตัดได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น ตำแหน่งของก้อนมะเร็ง, ขนาดและจำนวนก้อนมะเร็ง, ความแข็งแรงและสภาพความพร้อมของผู้ป่วยที่จะรับการผ่าตัด หรือมีโรคตับแข็งหรือโรคอื่น เช่น โรคหัวใจ ร่วมด้วย นอกจากวิธีการผ่าตัดแล้ว มีการศึกษาวิจัยว่า การให้ยาเคมีบำบัดทางหลอดเลือดดำและการฉายรังสีนั้น ให้ผลการรักษาที่ไม่ดีนักในผู้ป่วยกลุ่มนี้

2. การฉีดยาเคมีบำบัดและสารอุดกั้นหลอดเลือดผ่านทางสายสวนหลอดเลือดแดง (Transarterial-oily chemoembolization; TOCE) เป็นวิธีการรักษาโดยการฉีดยาเคมีบำบัดเข้าทางเส้นเลือดแดง ที่ไหลผ่านตรงไปเลี้ยงก้อนมะเร็ง ทำให้ก้อนมะเร็งยุบหรือฝ่อได้ แต่โอกาสที่จะหายขาดนั้นมีน้อย

3. การฉีดทำลายมะเร็งด้วยแอลกอฮอล์ Alcohol ablation (Percutaneous ethanol injection; PEI) เป็นวิธีการรักษาโดยจะใช้เข็มสอดผ่านทางผิวหนังเข้าไปฉีดสารแอลกอฮอล์ 95% ethanol ที่ก้อนมะเร็งที่มีขนาดเล็กกว่า 3 เซนติเมตร เป็นวิธีการรักษาที่แพทย์เลือกทำมากที่สุด ซึ่งจะนำวิธีการนี้มาทำการรักษาผู้ป่วยที่ผ่าตัดไม่ได้

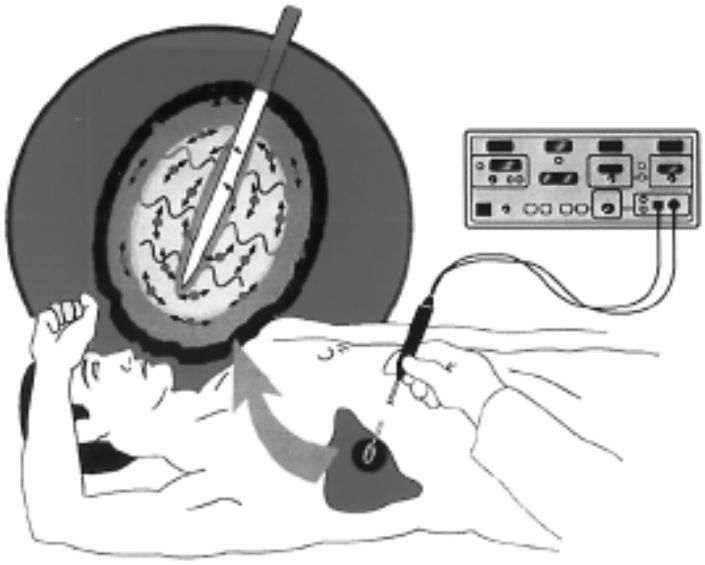
4. การทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave ablation) เป็นการรักษาโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ผ่านทางเข็มทำให้เซลล์มะเร็งเกิดความร้อนและตายไปในที่สุด ใช้ได้กับก้อนมะเร็งขนาด 3-5 เซนติเมตร

5. การทำลายเซลล์มะเร็งด้วยความเย็น (Cryosurgery) เป็นวิธีการรักษาโดยใช้ความเย็นจัดที่อุณหภูมิ ต่ำกว่า –35 องศาเซลเซียส จี้ทำลายก้อนมะเร็ง การรักษาด้วยวิธีนี้ต้องมีการผ่าตัดร่วมด้วย ดังนั้นจึงอาจทำให้เกิดโรคแทรกซ้อนได้ และนอกจากนี้แล้วการรักษาด้วยวิธีนี้ก็มีค่าใช้จ่ายในการรักษาที่สูงด้วย

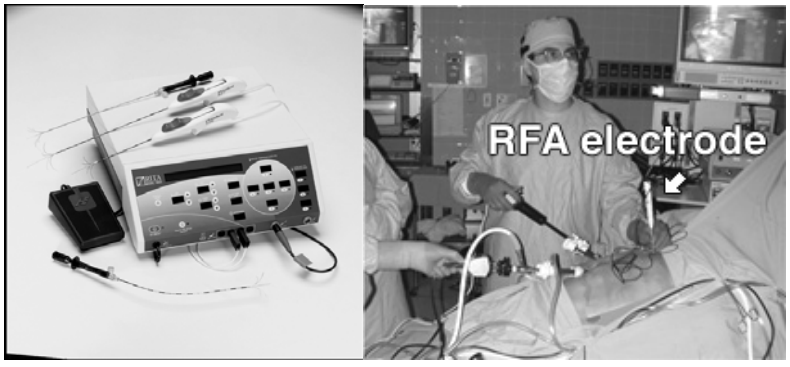
6.การทำลายเซลล์มะเร็งด้วยเลเซอร์ (Laser ablation) Laser-induced thermotherapy; LiTT โดยการรักษาด้วยวิธีนี้จะใช้แสงเลเซอร์ยิงทำลายก้อนมะเร็ง การรักษาโดยใช้เลเซอร์พบว่าค่าใช้จ่ายในการรักษาค่อนข้างสูง

7. การทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radiofrequency Ablation; RFA) เป็นวิธีการรักษาล่าสุด คือการนำคลื่นวิทยุความถี่สูง (radiofrequency) มาเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนต่อเนื้อเยื่อผ่านทางเข็มที่สอดผ่านทางผิวหนังเข้าไปที่ก้อนมะเร็ง ทำให้เซลล์มะเร็งแห้งฝ่อตายในที่สุด ใช้ได้กับมะเร็งขนาดไม่เกิน 5-7 เซนติเมตร เป็นวิธีที่แพทย์เลือกใช้แทนการฉีดทำลายเซลล์มะเร็งด้วยแอลกอฮอล์

การรักษาในรูปแบบการใช้คลื่นความถี่วิทยุ (Radiofrequency Ablation) เป็นวิธีการรักษามะเร็งที่ถูกนำมาใช้รักษาในกรณีที่ผู้ป่วยไม่สามารถทำการผ่าตัดได้ โดยวิธีการรักษารูปแบบนี้ให้ผลการรักษาที่ดี สะดวก รวดเร็วและมีภาวะแทรกซ้อนต่ำ ซึ่งการรักษาด้วยการใช้ความถี่วิทยุจะกระทำโดยการสอดเข็มเข้าไปในก้อนมะเร็งและปล่อยคลื่นความถี่วิทยุเข้าไปจนทำให้เกิดความร้อนและความร้อนนี้เองก็จะทำให้เกิดการทำลายก้อนมะเร็ง ซึ่งบางส่วนของก้อนมะเร็งจะกลายเป็นก๊าซ ขณะที่บางส่วนเกิดการหดตัวและถูกพังผืด (Fibrous tissue) แทรกเข้ามาทดแทน



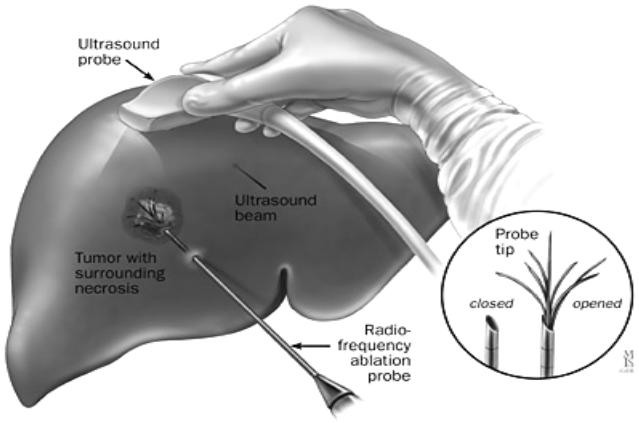
รูปที่ 2.9 แสดงรูปแบบการทำลายเซลล์มะเร็งตับด้วยคลื่นความถี่วิทยุ



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของเครื่องกำเนิดความถี่วิทยุและอิเล็กโทรด ในการรักษามะเร็งด้วย คลื่นความถี่วิทยุ

การทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นความถี่วิทยุ เป็นวิธีการใช้เครื่องจี้ให้ก้อนมะเร็งฝ่อลง หลักการทำงานคือเครื่องกำเนิด (Generator) จะปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านไปยังโพรบ โดยตัวผู้ป่วยจะเป็นส่วนหนึ่งของวงจรด้วยการติดแผ่นอิเล็กโทรดลงบนผิวหนัง ซึ่งอยู่ใกล้กับบริเวณก้อนมะเร็ง โดยใช้

การเหนี่ยวนำไฟฟ้าจากเครื่อง ทำให้เกิดคลื่นความถี่สูงถึง 300-500 kHz และจะใช้โพรบที่มีลักษณะเป็นเข็ม ขนาด 17G-14G (เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6-2.0 mm) ยาวประมาณ 20 เซนติเมตร หรือเข็มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร สอดเข้าไปก้อนมะเร็งทำให้ก้อนมะเร็งเกิดความร้อนขึ้น การทำให้เกิดความร้อน 40 องศาเซลเซียสขึ้นไป นาน 15-20 นาที จะสามารถทำให้เกิดรอยแผล (Tumor necrosis) ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40-50 มิลลิเมตร โดยหลักการนี้คือทำให้เกิดความร้อนที่มากพอจะทำให้เซลล์ตายและให้เวลานานพอที่จะแผ่ขยายออกไปรอบๆโดยไม่ทำให้ก้อนมะเร็งถูกเผาไหม้เกรียมได้ขนาดหนึ่ง แต่การเพิ่มเวลาไม่ได้ทำให้เพิ่มขนาดปริมาตรที่เซลล์ตาย เพราะเนื้อเยื่อที่อยู่ใกล้ อิเล็กโทรด จะร้อนขึ้นเรื่อยๆจนเซลฝ่อแห้งลงหรือไหม้เกรียม และกลายเป็นฉนวนทำให้มีความต้านทานสูงขึ้น ส่งผลให้ส่งคลื่นความถี่วิทยุได้น้อยลง และมีการกระจายความร้อนน้อยลงไปด้วยดังนั้นเข็มแต่ละชนิดจะมีข้อกำหนด สำหรับการทำ ลายเซลล์มะเร็งเฉพาะของตนเอง โดยทั่วไป เข็มทำจากโลหะไม่เป็นสนิมอย่างดี มีความแข็งแรงสูง หุ้มด้วยวัสดุที่ไม่ทำให้เกิดความร้อนหรือทำลายเนื้อเยื่อส่วนดี ยกเว้นส่วนปลายเข็ม (Active zone) จะมีความยาวประมาณ 1-3เซนติเมตรซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน



รูปที่ 2.11 แสดงการใช้อัลตราซาวด์เป็นเครื่องมือนำทางหาตำแหน่งการรักษามะเร็งตับ

ในการรักษามะเร็งด้วยคลื่นความถี่วิทยุ การรักษาจะทำโดยแพทย์ด้วยการเจาะผ่านผิวหนังเข้าไปยังก้อนมะเร็งตับ โดยใช้อัลตราซาวด์ (ultrasound), เอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (computed tomography) หรือ เอ็มอาร์ไอ (MRI; magnetic resonance imaging) เป็นเครื่องมือนำทางให้เข็มเข้าสู่เป้าหมายก้อนมะเร็ง โดยผู้ป่วยได้รับการฉีดยาชาเฉพาะที่ ยกเว้นในรายที่จำเป็นอาจต้องผ่าตัดเปิดช่องท้อง เพื่อนำเข็มเข้าสู่เป้าหมายได้ตามต้องการ จากนั้นเนื้อเยื่อรอบปลายเข็มจะถูกกระตุ้นให้สั่นสะเทือน จึงเกิดความร้อน 90-100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สามารถทำให้เซลล์มะเร็งตายได้ (เซลล์มะเร็งตายที่อุณหภูมิ 47-53 องศาเซลเซียส) โดยรอบปลายเข็ม หากทำตามข้อกำหนดที่วางไว้ก็จะไม่ก่อให้เกิดผลข้างเคียงต่อเนื้อเยื่อที่อยู่รอบๆ การรักษาวิธีนี้เป็นการรักษาที่จัดอยู่ใน

กลุ่ม Minimal invasive method spectrum of image-guided thermotherapy ด้วยหลักการนี้เอง ผลการรักษาจะขึ้นอยู่กับขนาดของก้อนมะเร็งและดุลยพินิจของแพทย์ การรักษามะเร็งด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่มีการใช้ในโรงพยาบาล และสถาบันการวิจัยต่างๆ มักใช้อัลตราซาวด์ เป็นตัวนำเข็มเข้าสู่เป้าหมาย เพราะสามารถมองเห็นขณะที่เข็มเคลื่อนเข้าสู่ก้อนมะเร็ง ได้ดีกว่าการใช้เครื่องมืออื่น นอกจากนี้อัลตราซาวด์สามารถจะเห็นขอบเขตสีขาวของความร้อนและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในก้อนมะเร็ง ขณะที่ทำการรักษาด้วย แต่ขอบเขตที่เห็นจากอัลตราซาวด์เป็นเพียงขอบเขตที่หวังผล Coagulated volume โดยประมาณเท่านั้น