บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

น้ำหนักแห้งของผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือด คือน้ำหนักตัวต่ำที่สุดของผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการรักษาโดยวิธีฟอกเลือด ขณะที่ทำการฟอกเลือดเสร็จ โดยที่ไม่มีอาการของภาวะน้ำเกินหรือขาด ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอัตราการเจ็บป่วยตลอดจนคุณภาพชีวิตของผู้ป่วย พบว่าหากผู้ป่วยมีภาวะน้ำในร่างกายสูงกว่าปกติ(over estimation of dry weight) จะก่อให้เกิดภาวะความดันโลหิตสูง หัวใจห้องล่างซ้ายโต หรือเกิดภาวะหัวใจล้มเหลวตามมาได้[1] ในทางตรงข้ามถ้าหากน้ำหนักแห้งน้อยกว่าปกติ จะก่อให้เกิดภาวะความดันโลหิตต่ำระหว่างฟอกเลือด (intradialytic hypotension) หรือเกิดอาการอื่นๆ ของภาวะการขาดสารน้ำในร่างกาย เช่น ตะคริว (cramp) หน้ามืด อาการต่างๆเหล่านี้ทำให้เกิดผลเสียต่อการทำงานของหัวใจและอวัยวะอื่นๆได้[1] จึงมีการพัฒนาวิธีการหาน้ำหนักแห้ง ในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือด ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังไม่มีวิธีใดที่สามารถหาน้ำหนักแห้งได้อย่างแม่นยำ

2.2 เครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบร่างกาย (bioimpedance machine)

เครื่อง bioimpedance เป็นเครื่องมือที่นำมาใช้วัดระดับปริมาณสารต่างในร่างกาย (body composition) มานานกว่า 40 ปี[6,13] สามารถใช้ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือนี้คำนวณปริมาณสารอาหารต่างๆในร่างกาย ได้แก่ โปรตีน หรือไขมัน สารน้ำทั้งในเซลล์และนอกเซลล์ ตลอดจนปริมาณกล้ามเนื้อในร่างกาย สามารถใช้เครื่อง bioimpedance ใช้ได้อย่างสะดวก ปลอดภัย และค่าใช้จ่ายในการวัดน้อย จึงมีการนำเครื่อง bioimpedance มาใช้ประโยชน์ต่างๆ อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เช่นการวัด bioimpedance เพื่อประเมินการภาวะทุโภชนาการ[14,15] หรือประเมินปริมาณน้ำในร่างกาย เพื่อใช้หาการกระจายตัวของน้ำในร่างกาย (volume of distribution)[16,17] และสามารถนำมาใช้ในการประเมินปริมาณการกระจายของสารน้ำในเซลล์และนอกเซล[18,19]

2.2.1 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบร่างกาย[20]

bioimpedance เป็นการวัดคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ความต้านทานกระแสไฟฟ้า และความสามารถในการเก็บประจุของร่างกาย ซึ่งคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้สัมพันธ์กับส่วนประกอบต่างๆของร่างกาย (body composition) ได้แก่ สารน้ำ โปรตีนและไขมันในร่างกาย

การวัดค่าทางไฟฟ้าของเครื่อง bioimpedance ของสิ่งใดสิ่งหนึ่ง คือการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านสิ่งของนั้นและวัดค่าความต้านทาน (resistant; R) ค่าการเก็บประจุ (reactant; Xc) ค่ามุมที่

ยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่าน (phase angle) และค่า bioimpedance(Z) (รูปที่ 1) พบว่าค่า bioelectrical impedance ของวัตถุหนึ่งจะแปรผันตามความยาวและแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัด[21]

$Z = \rho L / A$ สมการที่ 1

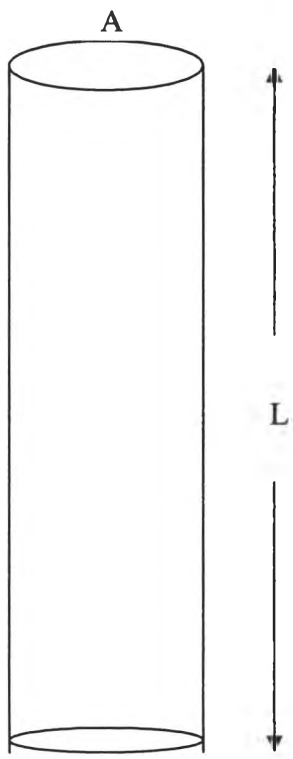
เมื่อคูณสมการที่ 1 ด้วยความยาวทั้งเศษและส่วน

$Z = \rho L/A \times L/L$ สมการที่ 2

$Z = \rho L^2 / V$ สมการที่ 3

$V = \rho L^2 / Z$ สมการที่ 4

- Z= ค่า bioelectrical impedance (ohm)
- ρ = ค่าความต้านทานต่อหนึ่งหน่วย (ohm-cm)
- L= ความยาว (cm)
- A= พื้นที่หน้าตัด (cm^2)
- V = ปริมาตร (cm^3)

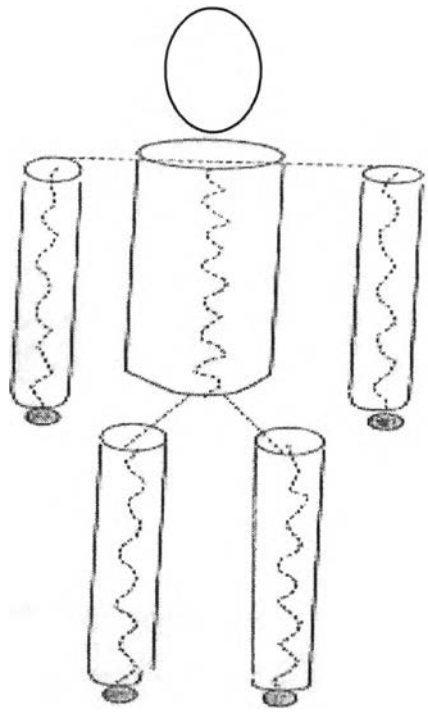


$Z = \rho L / A$

รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า bioelectrical impedance กับความยาว พื้นที่หน้าตัด และค่าความต้านทานต่อหนึ่งหน่วย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

bioelectrical impedance ของร่างกายจะทำให้สามารถคำนวณปริมาตรของร่างกายได้ [21] เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านร่างกายเพื่อวัดค่า bioelectrical impedance โดยกำหนดให้แต่ละส่วนของร่างกายเป็นทรงกระบอก

เนื่องจากแต่ละส่วนของร่างกายมนุษย์มีอวัยวะที่แตกต่างกัน เช่น แขนหนึ่งข้างประกอบด้วย กระดูก ไขมัน กล้ามเนื้อ เส้นเลือดและเลือด เป็นต้น ส่วนประกอบที่ต่างกันนี้จะมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นกับปัจจัยหลายชนิด เช่น ความเป็นประจุของโมเลกุลพื้นฐาน ความหนาแน่นของสารที่แตกต่างกัน สารบางชนิดมีความสามารถในการแตกเป็นประจุได้ดี เช่น เลือดและเกลือแร่ จะมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าส่วนอื่น ในขณะที่ ไขมัน และกระดูกจะมีความสามรถในการนำไฟฟ้าได้ต่ำที่สุด ดังนั้นเมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านไปในอวัยวะหนึ่ง บริเวณของร่างกายที่ปราศจากไขมันและกระดูก เช่น ปริมาณน้ำนอกและในเซลล์ และกล้ามเนื้อจะเป็นบริเวณที่กำหนดค่า bioelectrical impedance[6]

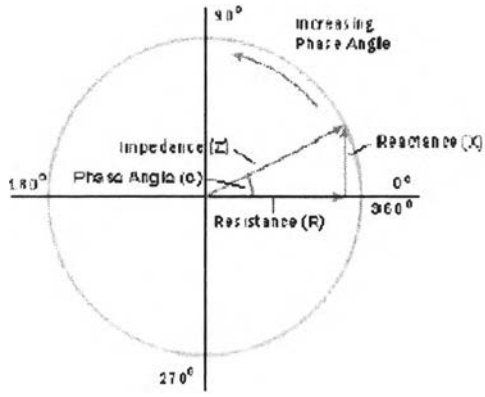
ในอีกด้านหนึ่ง ค่า bioelectrical impedance (Z) จะมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทาน (resistant; R) และค่าการเก็บประจุ (reactant; Xc) ดังสมการที่ 5 และรูปที่ 3

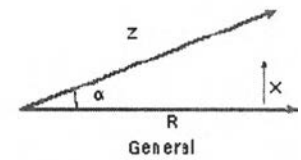
$$Z^2 = R^2 + Xc^2 \qquad \text{สมการที่ 5}$$

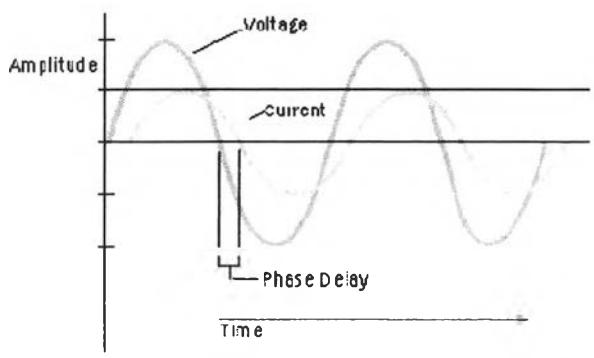
- Z = ค่า Bioelectrical impedance
- R = ค่าความต้านทาน
- Xc = ค่าการเก็บประจุ

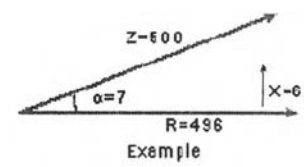
ค่าความต้านทานในร่างกายคือความสามารถในการต้านกระแสไฟฟ้าของร่างกาย ซึ่งเกิดจากชนิดของอวัยวะดังที่กล่าวมาแล้ว ขณะที่ค่าการเก็บประจุของร่างกาย คือปริมาณการเก็บสะสมประจุไฟฟ้าของร่างกายจนถึงระดับที่สามารถให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ โดยจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการเก็บประจุของเซลล์[6] ซึ่งขึ้นกับเยื่อหุ้มเซลล์เป็นสำคัญ โดยมี โปรตีน และ phospholipids ภายในเยื่อหุ้มเซลล์นี้เป็นตัวกำหนด ซึ่งหากโปรตีนและ phospholipids บนผิวเซลล์มีปริมาณมากจะมีค่าการเก็บประจุสูงมากขึ้นด้วยและเมื่อค่าการเก็บประจุสูง จะใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นเพื่อให้มีการนำไฟฟ้าได้ โดยจะเรียกมุมองศาที่เริ่มมีการนำไฟฟ้าหลังจากปล่อยกระแสไฟฟ้าว่า phase angle (α) โดยจะมีค่าเท่ากับมุมของ Bioelectrical impedance vector (Z) กับแกนของค่าความต้านทาน (R) ดังแสดงในรูปที่ 3

ดังนั้น ค่า bioelectrical impedance มีความสัมพันธ์กับความยาวและพื้นที่หน้าตัดของสิ่งของหนึ่งตามสมการที่ 1 โดยมีคุณสมบัติของสิ่งของนั้นเป็นตัวกำหนดร่วมด้วยได้แก่ ความต้านทานและค่าการเก็บประจุ ตามสมการที่ 5





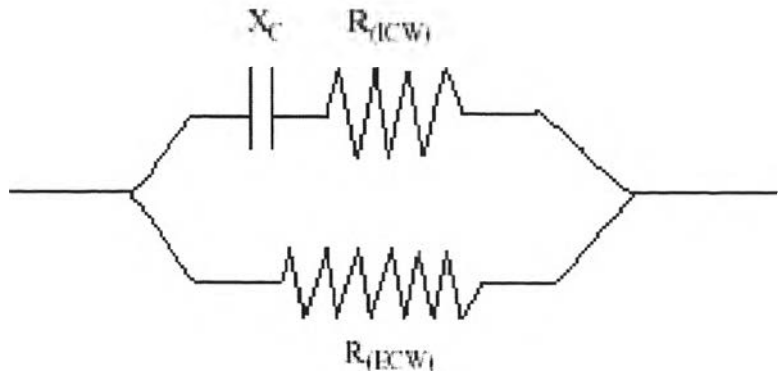




รูปที่ 3 A= ลักษณะกระแสไฟฟ้าเมื่อวาดตามมุมของวงกลม B= ลักษณะกระแสไฟฟ้าเมื่อวาดตามแกน จะมีลักษณะเป็น sine wave โดยความสูงจะเท่ากับความต่างศักย์ (voltage): เส้นกราฟสีม่วงแสดงถึงกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยสู่ผู้ป่วย และเส้นกราฟสีเหลืองคือค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ โดยที่มุมองศาของกราฟที่เริ่มต้นช้ากว่า คือ phase angle สาเหตุที่เกิดมุมองศาที่แตกต่างกันคือความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของเซลล์ในร่างกาย (Xc) Cและ D = การแสดงความสัมพันธ์ของค่า bioimpedance(Z) และค่าความต้านทาน(R) และค่าการเก็บประจุไฟฟ้า(Xc) โดย $Z^2 = R^2 + Xc^2$

สามารถนำค่าที่วัดได้จากเครื่องนี้มาคำนวณปริมาณของสารต่างๆในร่างกาย โดยเชื่อว่าวงจรการไหลของกระแสไฟฟ้าในร่างกายมีลักษณะเป็นวงจรขนานกันระหว่าง วงจรภายนอกเซล (extracellular compartment)กับ ผิวเซลล์(cell membrane) และวงจรภายในเซลล์ (intracellular compartment)22 (รูปที่ 4) โดยพบว่า ค่าความต้านภายนอกเซลล์ขึ้นกับตัวถูกละลายภายนอกเซลล์ ได้แก่ โซเดียม (Na^+) ขณะที่ภายในเซลล์ขึ้นกับโปแตสเซี่ยม (K^+)

Fricke's circuit
Two parallel electrical conductors:
$R_{(ECW)}$: H_2O-Na
$R_{(ICW)}$: H_2O-K
isolated by a cell membrane (X_C)



รูปที่ 4 แสดงวงจรการไหลของกระแสไฟฟ้าในร่างกายR(ECW) คือ ค่าความต้านทานส่วนที่อยู่นอกเซลล์

R(ICW) คือค่าความต้านทานส่วนที่อยู่ภายในเซลล์

X_c คือค่าการเก็บประจุ

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายจะสามารถคำนวณปริมาณน้ำของร่างกาย(total body water;TBW) ปริมาณมวลของร่างกายที่ปราศจากไขมัน(fat free mass;FFM) โดยพบว่าวิธีนี้มีความสัมพันธ์กับการหาปริมาณสารน้ำทั้งหมดของร่างกายกับวิธี กัมมันตรังสีด้วยสาร D2O และ ^3H2O [17,23,24] สามารถทราบการกระจายของสารน้ำนอกเซลล์(ECW) สารน้ำในเซลล์ (ICW) โดยอาศัยคุณสมบัติของการเก็บประจุของเยื่อบุผิวเซลล์ เมื่อใช้ไฟฟ้าที่มีความถี่ต่ำ เยื่อบุผิวเซลล์จะทำหน้าที่เสมือนฉนวนไฟฟ้า ไม่สามารถผ่านเข้าในเซลล์ ค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้จะแสดงถึงปริมาณสารน้ำนอกเซลล์เป็นสำคัญ หากใช้ไฟฟ้าที่มีความถี่สูง กระแสไฟฟ้าจะผ่านไปในเซลล์มากขึ้นทำให้ทราบถึงปริมาณสารน้ำทั้งร่างกาย (รูปที่ 5)[22]

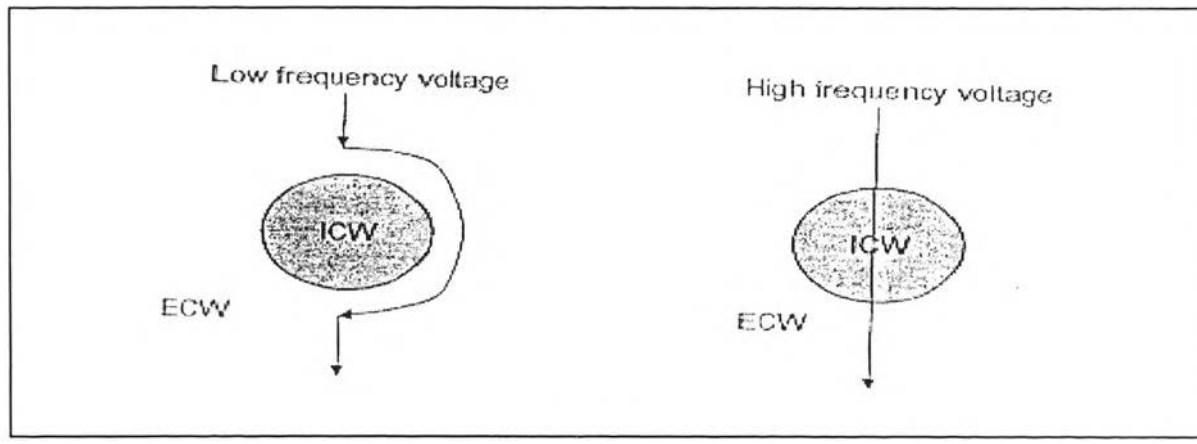
เมื่อนำค่า bioelectrical impedance มาคำนวณปริมาณน้ำในร่างกาย โดยใช้ค่าของเครื่อง bioelectrical impedance ทั้งสองวิธี จะสามารถตรวจปริมาณน้ำในเซลล์และน้ำนอกเซลล์ได้ โดย [19]

VECW = $\rho L^2 / Z$ low frequency สมการที่ 6

VTBW = $\rho L^2 / Z$ high frequency สมการที่ 7

VICW = VTWB - VECW สมการที่ 8

- VTBW คือปริมาณน้ำทั้งร่างกาย
- VECW คือน้ำนอกเซลล์
- VICW คือน้ำในเซลล์
- Zlow frequency คือค่า โดยใช้กระแสไฟฟ้าความถี่ต่ำ
- Zhigh frequency คือค่า โดยใช้กระแสไฟฟ้าความถี่สูง



รูปที่5 แสดงความแตกต่างระหว่างกระไฟฟ้าที่ไหลผ่านเซลล์เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าที่มีความถี่สูง แต่เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าที่มีความถี่ต่ำจะไม่ผ่านเซลล์ทำให้ กระแสไฟฟ้าผ่านส่วนที่อยู่นอกเซลล์มากกว่า low frequency คือ กระแสไฟฟ้าที่มีความถี่ต่ำมาก high frequency คือกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่สูง

2.3 **ชนิดของเครื่อง** bioelectrical impedance **และตำแหน่งของขั้ว** (electrode) **ที่ใช้วัดค่า** bioelectrical impedance

2.3.1 **เครื่อง** bioelectrical impedance[20]

a) **เครื่อง** bioelectrical impedance **ชนิดความถี่เดียว** (single frequency;SF-BIA)
b) **เครื่อง** bioelectrical impedance **ชนิดหลายความถี่** (multifrequency; MF-BIA)
c) **เครื่อง** bioelectrical spectroscopy (BIS)

a) **เครื่อง** bioelectrical impedance **ชนิดความถี่เดียว** (single frequency;SF-BIA)

เครื่อง bioelectrical impedance ชนิดความถี่เดียวมักใช้ ความถี่ที่ 50 kHz โดยที่ค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องที่ใช้ความถี่นี้สามารถแสดงผลถึงปริมาณสารน้ำทั้งในและนอกเซลล์ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านทั้ง 2 ส่วน คือบริเวณนอกเซลล์และในเซลล์ แต่จะผ่านส่วนในเซลล์ประมาณ 25% ค่าที่ได้จากเครื่องนี้จึงมักแสดงถึงสารน้ำทั่วร่างกายมากที่สุด[22] การใช้ความถี่นี้มีข้อดีคือ

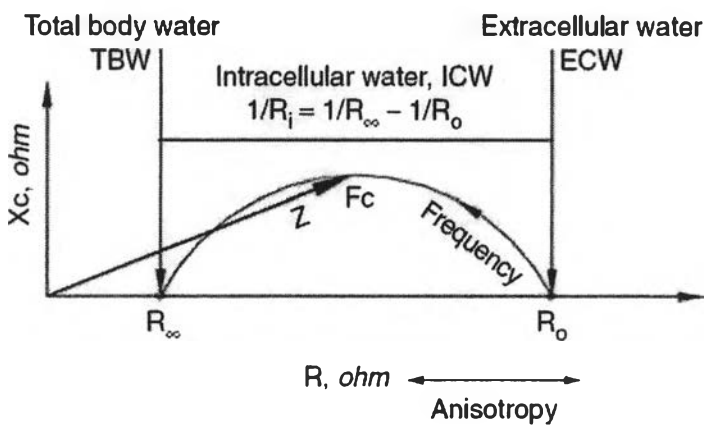
ความแม่นยำในการตรวจซ้ำ (reproducibility)[16] โดยเฉพาะเมื่อเทียบการใช้กระแสไฟฟ้าที่มีความถี่ต่ำเช่น 1 kHz หรือสูง

b) **เครื่อง** bioelectrical impedance **ชนิดหลายความถี่** (multifrequency; MF-BIA)

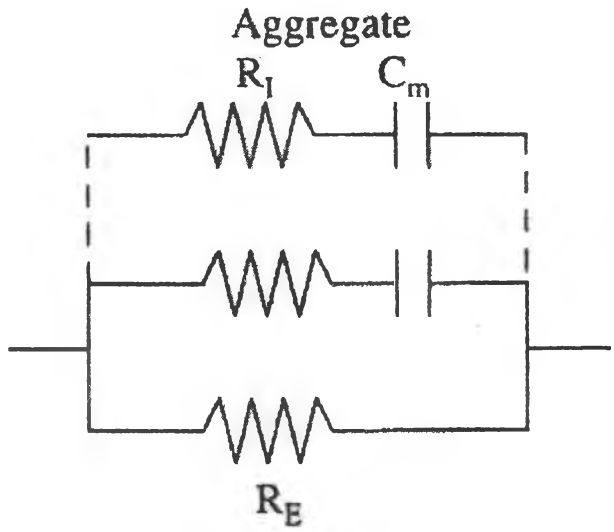
เครื่องนี้ใช้หลักการเดียวกับเครื่อง SF-BIA แต่ใช้หลายความถี่ โดยอาศัยคุมสมบัติการเป็นตัวเก็บประจุของเยื่อบุผิวเซลล์ ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านในเซลล์ได้ดีเมื่อใช้ความถี่ที่สูงขึ้น ทำให้สามารถเปรียบเทียบค่าที่ได้จากความถี่ที่แตกต่าง จึงทำให้ทราบถึงการกระจายตัวของน้ำในร่างกายทั้งในส่วนของน้ำนอกเซลล์และในเซลล์[25] ซึ่งเป็นข้อดีเมื่อเทียบกับเครื่อง SF-BIA แต่เครื่องนี้มีความแม่นยำในการหาน้ำทั่วตัวน้อยกว่า SF-BIA และมีข้อมูลแสดงถึงข้อจำกัดของเครื่องในการแสดงการเปลี่ยนแปลงของการกระจายตัวของน้ำในส่วนต่างๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง[26]

c) **เครื่อง** bioelectrical spectroscopy (BIS)[27]

เครื่องนี้มีความแตกต่างในวิธีการคำนวณส่วนต่างๆของร่างกาย โดยใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ร่วมกับวิธีการวัดค่า bioelectrical impedance จากการเปลี่ยนแปลงของความถี่[20] พบว่าหากใช้ความถี่ที่เปลี่ยนไปขึ้นจะมีค่า ความต้านทาน(R)ค่า impedance(Z) และค่าการเก็บประจุ(Xc) เปลียนแปลงตามความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ใช้[28] ดังแสดงในรูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของค่าทางไฟฟ้าตามความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่วัดจะมีลักษณะเป็นรูปครึ่งวงกลมเกิดจากแบบจำลองการไหลไฟฟ้าตามแบบของ cole (cole model)ดังแสดงในรูปที่ 7 และคำนวณปริมาณน้ำในร่างกายจากความสัมพันธ์ของค่า Ri / Re และ อัตราส่วนของน้ำในเซลล์และน้ำนอกเซลล์(ICW/ECW)

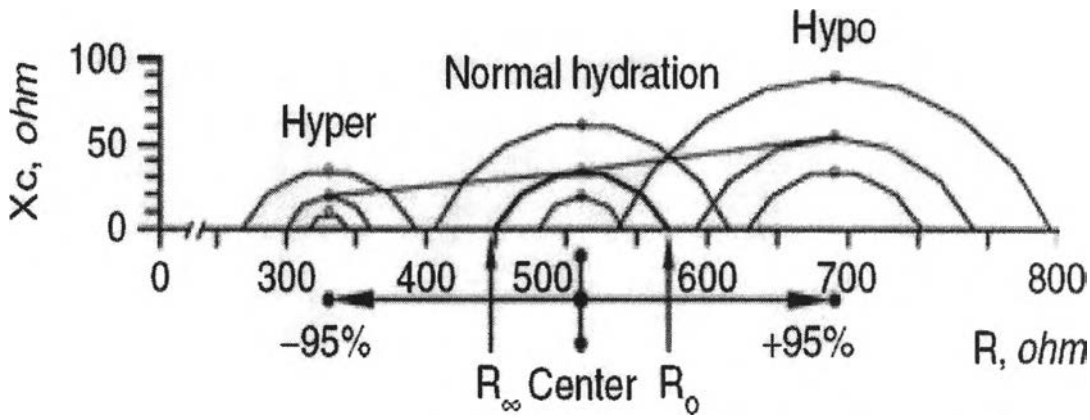


รูปที่6 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทาน(R) ค่าimpedance(Z) และค่าการเก็บประจุ(Xc) เปลียนแปลงตามความถี่ของกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 7 แบบจำลองวงจรการไหลของกระแสไฟฟ้าตามแบบของ cole (cole model)

วิธีการใช้เครื่องรุ่นนี้จะมีประโยชน์ในกลุ่มประชากรที่ไม่ทราบสมการในการคำนวณ หรือไม่ทราบการกระจายความแตกต่างของค่าในกลุ่มประชากรนั้น แต่การใช้วิธีนี้ในการหาส่วนประกอบของร่างกายยังคงมีความคลาดเคลื่อนเช่นเดียวกับการใช้ เครื่องวัดส่วนประกอบของร่างกายชนิดความถี่เดียวและหลายความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงความแตกต่างของวิธีการใช้เครื่อง bioelectrical spectroscopy ในประชากรที่มีความแตกต่างกันในแง่น้ำในร่างกาย และขนาดของร่างกาย

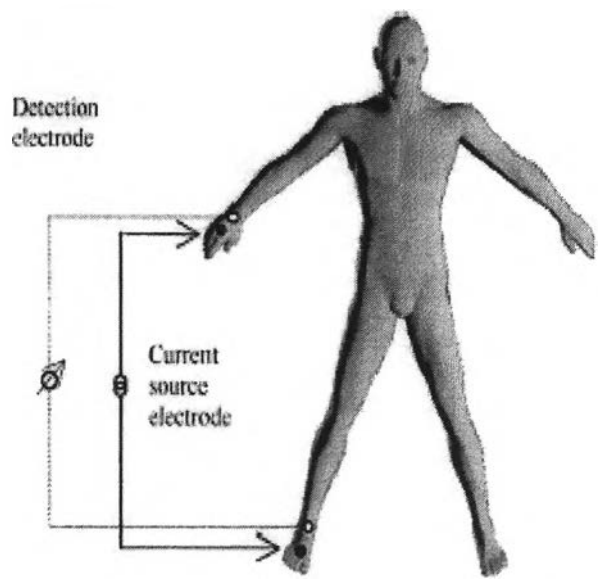
การศึกษาหลังสุดของ Piccoli[29] เปรียบเทียบวิธีการวัดค่าจากการวัดส่วนประกอบของร่างกายด้วยวิธีการใช้เครื่องวัดส่วนประกอบของร่างกายความถี่เดียว หลายความถี่และเครื่อง bioelectrical spectroscopy ในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือด 67 ราย พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และลามารถนำเครื่องวัดส่วยประกอบของร่างกายชนิดความถี่เดียวมาใช้วัดการเปลี่ยนแปลงน้ำในเซลล์และน้ำนอกเซลล์ในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือด

2.3.2 **ขั้วที่ใช้วัด** bioelectrical impedance (electrode)

a) **ขั้วชนิดไฟฟ้าไหลทั่วร่างกาย** (total body bioelectrical impedance)
b) **ขั้วชนิดไฟฟ้าไหลเฉพาะส่วน** (regional bioelectrical impedance)

a) **ขั้วชนิดไฟฟ้าไหลทั่วร่างกาย** (total body bioelectrical impedance)

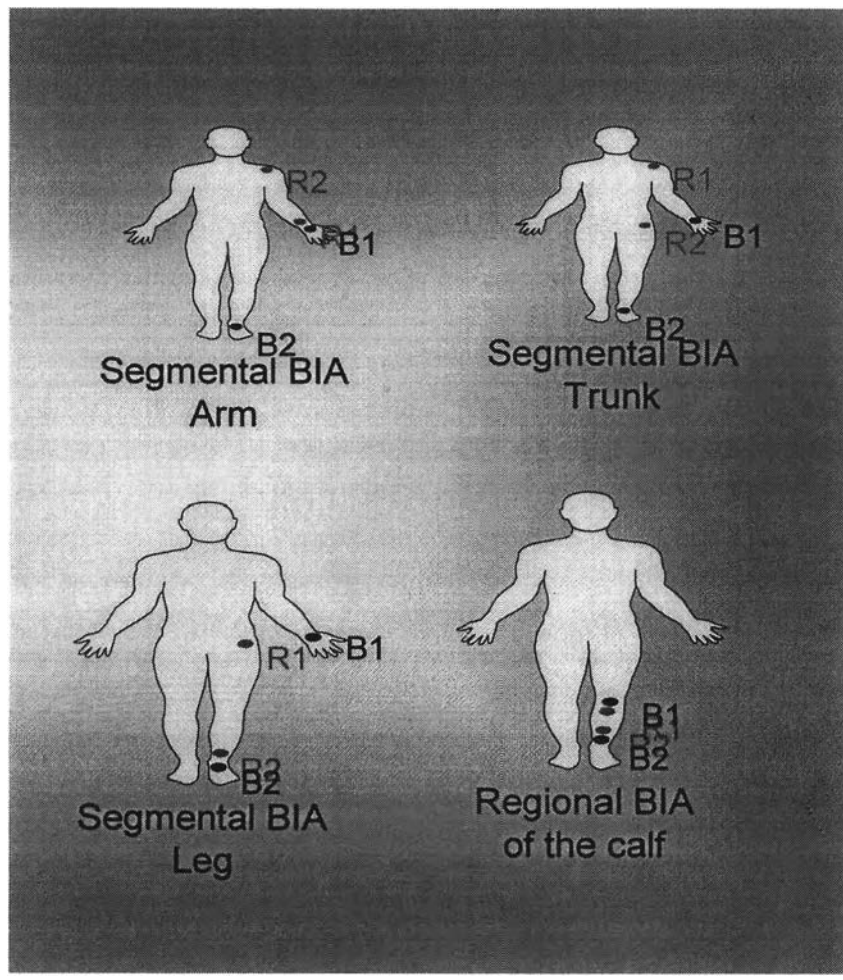
คือการติดขั้วและปล่อยกระแสไฟฟ้าเพื่อวัดค่า bioelectrical impedance โดยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านทั่วร่างกาย นิยมติด ขั้วไฟฟ้าที่บริเวณแขนและขาข้างเดียวกัน ด้านตรงข้ามกับเส้นเลือดที่ใช้สำหรับแทงสายฟอกเลือด(vascular assess)[30] ดังแสดงในรูปที่ 9 ค่าที่ได้จากวิธีนี้แสดงถึงค่าการนำไฟฟ้าทั้งร่างกายเฉลี่ย โดยค่าความต้านทานในส่วนลำตัวจะมีค่าต่ำกว่าส่วนอื่นมากเนื่องจะความหนาแน่นต่ำกว่าและมีพื้นที่หน้าตัดมากว่า ทำให้ผลที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อน แต่เนื่องจากเป็นวิธีที่มีข้อมูลมากที่สุดจึงยังคงเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด



รูปที่9 วิธีการวัดค่า bioelectrical impedance และตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดบริเวณแขนและขา

b) **ขั้วชนิดไฟฟ้าไหลเฉพาะส่วน** (regional bioelectrical impedance)[31] วิธีการติดขั้วให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเฉพาะส่วน ได้รับความนิยมมากขึ้น ทั้งในแง่การนำมาใช้วัดส่วนประกอบของร่างกายเฉพาะส่วน หรือเพื่อใช้วัดส่วนประกอบของทั้งร่างกาย เพื่อหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนของผลจากการวัดค่า bioelectrical impedance ในส่วนลำตัวซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดมากกว่า ทำให้ค่าที่ได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง โดยเฉพาะวิธีการติดขั้วกระแสไฟฟ้าบริเวณเท้าเพื่อวัดค่า bioelectrical impedance ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินปริมาณส่วนประกอบของร่างกาย[32] ในร่างกายเนื่องจากบริเวณนี้เป็นบริเวณที่มักมี

อาการบวมเมื่อผู้ป่วยมีภาวะน้ำในร่างกายเกิน ค่าที่ได้จากการวัดด้วยวิธีนี้เป็นค่าที่ความแม่นยำสูงและสามารถใช้ประเมินสารน้ำในร่างกายได้[33] มีการนำวิธีการติดขั้วไฟฟ้าชนิดมาใช้ในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังระหว่างการฟอกเลือด[33,34] นอกจากบริเวณเท้ายังมีการติดขั้วไฟฟ้าในตำแหน่งอื่นเช่น แขน หรือลำตัว ดังแสดงในรูปที่10



รูปที่10 ชนิดต่างๆของวิธีการวัดค่า bioelectrical impedance โดยตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ลักษณะเฉพาะส่วน

- R1 คือ ขั้วที่ใช้ปล่อยกระแสไฟฟ้าอันดับที่หนึ่ง
- R2 คือ ขั้วที่ใช้ปล่อยกระแสไฟฟ้าอันดับที่สอง
- B1 คือ ขั้วที่ใช้วัดกระแสไฟฟ้าอันดับที่หนึ่ง
- B1 คือ ขั้วที่ใช้วัดกระแสไฟฟ้าอันดับที่หนึ่ง

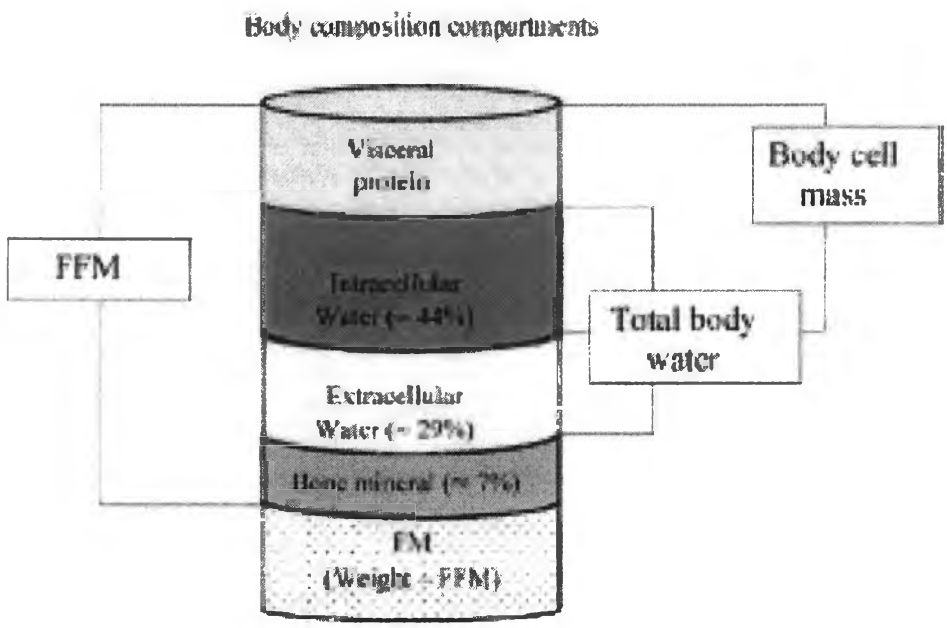
2.4 **การตรวจหาส่วนประกอบในร่างกาย** (body composition)[20,35,36]

ส่วนประกอบของร่างกายประกอบด้วยส่วนต่างๆ ได้แก่ ไขมัน กระดูกและเกลือแร่ สารน้ำนอกเซลล์ สารน้ำในเซลล์ และโปรตีนในเซลล์และผิวเซลล์ รูปที่ 11 เรียกว่ารูปแบบส่วนประกอบร่างแบบสองส่วน (two compartment model;2-C) ในร่างกายประกอบด้วยน้ำมากกว่าส่วนประกอบอื่น และเนื่องจากน้ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในส่วนของมวลของร่างกายไร้ไขมัน (fat free mass, FFM) และ สามารถคำนวณมวลของร่างกายไร้ไขมัน[37] โดย

$$FFM = TBW / 0.732 \qquad \text{สมการที่ 9}$$

$$FM = BW - FFM \qquad \text{สมการที่ 10}$$

- FFM(fat free mass) คือมวลของร่างกายไร้ไขมัน
- FM(fat mass) คือน้ำหนักของไขมันในร่างกาย
- TBW(Total body water) คือปริมาณน้ำในร่างกาย
- 0.732 เป็นค่าคงที่ของสารน้ำต่อมวลของร่างกายไร้ไขมัน (hydration constant of the fat-free body)



รูปที่ 11 แสดงส่วนประกอบของร่างกาย โดย FFM = มวลของร่างกายปราศจากไขมัน; FM = น้ำหนักของไขมันในร่างกาย; Total body water = สารน้ำทั้งร่างกาย; intracellular water = สารน้ำภายในเซลล์; extracellular water = สารน้ำภายนอกเซลล์; body cell mass = มวลของเซลล์ในร่างกาย

2.4.1 **การหาส่วนประกอบในร่างกาย** (body composition) **ด้วยวิธีทางนิวเคลียร** (isotope dilution)[38]

สามารถใช้วิธีทางนิวเคลียเพื่อตรวจหาส่วนประกอบในร่างกายโดยอาศัยหลักการของการแตกตัวของสารที่โมเลกุลไม่เสถียร เช่น ^{2}H ^{3}H จะแตกตัวเป็น ^{1}H และ electron ซึ่งจะมีความเสถียร และสามารถตรวจ electron ที่ออกมาได้ สามารถตรวจหาส่วนประกอบของร่างกายได้

การใช้วิธีทางรังสีนิวเคลียทำให้สามารถทราบการกระจายของน้ำในร่างกายได้ และถือเป็นวิธีมาตรฐานในปัจจุบัน โดยเฉพาะการใช้ deuterium ($^{2}H_2O$) เป็นตัวแทนสารน้ำ อาศัยหลักการของการกระจายตัวของน้ำในร่างกาย เมื่อบริหารสาร deuterium ในร่างกาย จะมีการกระจายสาร deuterium และสารน้ำในแต่ละส่วนของร่างกายโดยจะมีการกระจายตัวจนได้ค่าที่สมดุลของสารน้ำทั้ง 2 ชนิด เมื่อตรวจทางนิวเคลียในแต่ละส่วนของร่างกาย จะทราบการกระจายของสารน้ำในร่างกายเมื่อคำนวณ จาก

$$C_1V_1 = C_2V_2 \qquad \text{สมการที่ 11}$$

เมื่อแก้สมการ จะได้

$$V_2 = (C_1V_1)/C_2 \qquad \text{สมการที่ 12}$$

- C_1 คือ ความเข้มข้นของสาร deuterium ที่ใช้บริหารในตัวผู้ป่วย
- V_1 คือ ปริมาณของสาร deuterium ที่ใช้บริหารในตัวผู้ป่วย
- C_2 คือ ความเข้มข้นของสาร deuterium ที่วัดได้
- V_2 คือ ปริมาณของสารน้ำทั่วร่างกาย (total body water)

โดยจะสามารถตรวจปริมาณสารน้ำในร่างกายเมื่อบริหาร deuterium ในร่างกายนานจนระดับสาร deuterium ในร่างกายถึงจุดสมดุลจึงวัดความเข้มข้นในเลือด และสามารถนำค่าสารน้ำในร่างกายมาประเมินเป็น มวลของร่างกายปราศจากไขมัน (fat free mass) จากสมการที่ 9

ข้อจำกัดของการใช้ deuterium เพื่อหาส่วนประกอบของร่างกายมีข้อจำกัดคือ เมื่อบริหารสาร deuterium ในร่างกายจะเกิดการแลกเปลี่ยนโมเลกุลน้ำที่เกาะอยู่กับไขมันและโปรตีน ทำให้ปริมาณสารน้ำที่ได้มีค่ามากกว่าความเป็นจริงขึ้นกับปริมาณโปรตีนและไขมันในร่างกายซึ่งประมาณร้อยละ 4 นอกจากนั้นการคำนวณปริมาณมวลกายไร้ไขมันยังอาศัยรูปแบบ 2-C ซึ่งอาจจะมีความแตกต่างกันในแต่ละกลุ่มประชากรได้แก่ เพศ อายุ เชื้อชาติ อาชีพ(นักกีฬา) ปริมาณการดื่มน้ำ เป็นต้น การเตรียมสารละลาย deuterium ที่นำมาตรวจต้องใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นสูง ดังนั้นจึงไม่เป็นที่นิยม

2.4.2 การใช้เครื่อง bioelectrical impedance **ในผู้ป่วยเพื่อตรวจหาส่วนประกอบในร่างกาย** (body composition)[39-42]

พบว่าค่าการเก็บประจุจะสัมพันธ์กับปริมาณโปรตีนบนผิวเซลล์ และสัมพันธ์กับภาวะโภชนาการ (nutrition status) ค่าความต้านทานจะสัมพันธ์กับปริมาณสารน้ำในร่างกาย (hydration status) ตามทฤษฎีของ mixing คือค่าความต้านทานของสารละลายจะเพิ่มเมื่อตัวถูกละลายที่เป็นสารไม่นำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานและปริมาณน้ำในร่างกายว่ามีความสัมพันธ์แบบผกผัน คือหากมีปริมาณน้ำในร่างกายมากขึ้น(over hydration) ค่าความต้านทานของร่างกายจะลดลง แต่หากปริมาณสารน้ำในร่างกายลดลง(dehydration) ค่าความต้านทานของร่างกายจะเพิ่มขึ้น และนำค่าที่วัดได้มาคำนวณปริมาณน้ำในร่างกายโดยใช้สมการซึ่งได้จากการเก็บรวบรวมในห้องทดลองและการสำรวจค่าปกติในกลุ่มประชากร20 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการคำนวณสารน้ำในร่างกายจากค่าความต้านทาน ได้แก่ เพศ อายุ ความเจ็บป่วยของร่างกาย และเชื้อชาติ[43] มีการพัฒนาสมการเพื่อใช้ในการคำนวณส่วนประกอบของร่างกาย[20,44] ดังตารางที่ 1 ในประเทศไทยยังไม่มีข้อมูลใดที่สามารถบอกถึง สมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานของร่างกายกับปริมาณน้ำในร่างกายได้อย่างแม่นยำ

ตารางที่ 1 แสดงสมการเพื่อคำนวณปริมาณมวลไขมันในร่างกาย (fat mass) โดยใช้เครื่อง bioelectrical impedance ในการศึกษาที่ได้ตั้งแต่ปี ค.ศ.1990 โดยบอกถึงกลุ่มประชากร จำนวนประชากร เครื่องมือที่ใช้วัด วิธีวัดมาตรฐาน สมการที่ใช้ในการคำนวณ และความสัมพันธ์ของวิธีการวัดทั้งสองวิธี

Comments	n	Criterion measure	Equation	r2	BIA instrument
Body fat (%)					
Elderly, 65-94 yr	98	multifrequency	-23.58+20.03 (R50weight)/Ht2 +0.29 thigh circ-4.99 sex+0.52 arm circ	.73	RJL 101
Elderly, 65-94 yr	98	Densitometry	-18.89+22.12(R50weight)/Ht2+0.64 calf circ-4.13 sex	0.55	NA
Body fat (kg)					
Healthy subjects, 21-64 yr	104	Underwater, weighting , 2H2O	**Women**: -5.9150+0.7395 weight-0.3327 height+0.0846age+0.048 upperlimb R50+0.2705 trunkR50+0.0384lowerlimb R50-	0.93	NA

ตารางที่ 1 (ต่อ) แสดงสมการเพื่อคำนวณปริมาณมวลไขมันในร่างกาย (fat mass) โดยใช้เครื่อง bioelectrical impedance ในการศึกษาที่ได้ตั้งแต่ปี ค.ศ.1990 โดยบอกถึงกลุ่มประชากร จำนวนประชากร เครื่องมือที่ใช้วัด วิธีวัดมาตรฐาน สมการที่ใช้ในการคำนวณ และความสัมพันธ์ของวิธีการวัดทั้งสองวิธี

Comments	n	Criterion measure	Equation	r2	BIA instrument
	96		**Men**: -4.2422+0.7368weight-0.0482height+0.1170age+0.0393 upperlimbR50+0.5110trunkR50+0.0654lowerlimbR50-0.2560lowerlimb Xc	0.9	NA
Healthy subjects, 35-65 yr	139	multifrequency	14.94-0.079Ht2/R50+0.818weight-0.231height-0.0654sex weight+0.077age	0.90	RJL-103

R, resistance; Ht2/R, height2/resistance; Xc, reactance; V, body volume;Z5, impedance at 5kHz;Z100, impedance at 100kHz; 1 for men, 0 for women, unless otherwise stated; circ, circumference

RJL Systems, Inc, Clinton Twp, MI; Xitron Technologies, San Diego, CA; Valhalla Scientific, San Diego, CA;BIA-2000-M,Data Input, Hofheim, Germany

*%BF=((1.34/body density) – 0.35 age +0.56 mineral content-1)205.

+%BF=(4.95/body density)-4.5)100.

ตารางที่ 2 แสดงสมการเพื่อคำนวณปริมาณมวลไร้ไขมันในร่างกาย (Fat free mass) โดยใช้เครื่อง bioelectrical impedance ในการศึกษาที่ได้ตั้งแต่ปี ค.ศ.1990 โดยบอกถึงกลุ่มประชากร จำนวนประชากร เครื่องมือที่ใช้วัด วิธีวัดมาตรฐาน สมการที่ใช้ในการคำนวณ และความสัมพันธ์ของวิธีการวัดทั้งสองวิธี

Comments	n	Criterion measure	Equation	r2	BIA instrument
Healthy subjects, 18-94 yr	343	DXA	4.104+0.518 Ht2/R50+0.231weight+0.130Xc+4.229 sex	0.97	Xitron
Healthy subjects, 18-29 Yr	153	Densitometry	Women =5.49+0.476 Ht2/R50 +0.141 weight	NR	Valhalla
Healthy subjects, 30-49 Yr	122	Densitometry	Women =11.59+0.493 Ht2/R50+0.141 weight	NR	Valhalla
Healthy , ethnic divers	126	DXA	Women =+0.07+0.88 Ht1.97/Z50 (1.0/22.22)+0.081 weight	0.71	RJL-101
Healthy subjects, >16 Yr	661	Multi-C densitometry	12.44+0.34Ht2/R50+0.1534height+0.273 weight -0.127 age+4.56 sex	0.93	RJL-101
Healthy subjects, 12-71 Yr	202	Densitometry	6.37+0.64 weight+0.40Ht2/Z1MHZ -0.16 age-2.71 sex (men=1, women=2)	0.92	IMP BO-1
women, 18-60 Yr	95	Multi-C	20.05-0.04904R50+0.001254Ht2+0.1555 weight+0.1417Xc-0.0833age	0.75	Valhalla
Healthy subjects, 50-70 Yr	72	Densitometry	Women=6.34+0.474Ht2/R50+0.180weight	NR	Valhalla
Healthy subjects, 18-29 Yr	153	Densitometry	Men=5.32+0.485Ht2/R50+0.338weight	NR	Valhalla

ตารางที่ 2 (ต่อ) แสดงสมการเพื่อคำนวณปริมาณมวลไร้ไขมันในร่างกาย (Fat free mass) โดยใช้เครื่อง bioelectrical impedance ในการศึกษาที่ได้ตั้งแต่ปี ค.ศ.1990 โดยบอกถึงกลุ่มประชากร จำนวนประชากร เครื่องมือที่ใช้วัด วิธีวัดมาตรฐาน สมการที่ใช้ในการคำนวณ และความสัมพันธ์ของวิธีการวัดทั้งสองวิธี

Comments	n	Criterion measure	Equation	r2	BIA instrument
Healthy subjects, 12-94 Yr	1095	Multi-C	Women:-9.529+0.696Ht2/R50+0.168weight+0.016R50	0.83	
Healthy , ethnic divers	206	DXA	Men=+0.49+0.5C(Ht1.48/Z50)(1.0/1.21)+0.42weight	0.92	RJL-101
Healthy subjects, 30-49 Yr	111	Densitometry	Men=4.51+0.549Ht2/R50+0.163weight+0.092Xc	0.90	Valhalla
Healthy subjects, 35-65 Yr	139	Multi-C, 3H2O,TBK	14.94+00.279Ht2/R50+0.181weight+0.231height +0.064(sex weight)-0.077 age	0.90	RJL-103
Healthy subjects, 50-70 Yr	74	Densitometry	Men=-11.41+0.600Ht2/R+0.186 weight+0.226Xc	NR	Valhalla
Healthy subjects, 12-94 Yr	734	4 compart	Men:-10.678+0.652Ht2/R50+0.262weight+0.015R	0.90	RJL-101
Overweight women, 25-45 Yr	123	DXA	2.68+0.20Ht2/R50+0.19weight+2.55ethnicity(Caucasian=0,AfricanAmerican=1)+0.1157height	0.65	RJL-101
Overweight women, 25-45 Yr	123	DXA	2.04-0.02R50+0.19weight+2.63ethnicity(Caucasian=0,AfricanAmerican=1)+0.2583height	0.65	RJL-101
Elderly women, 62-72 Yr	93	DXA	-128.06+1.85BMI-0.63weight+1.07 height-0.03R50+100 waist-hip ratio	0.83	RJL-101

ตารางที่ 2 (ต่อ) แสดงสมการเพื่อคำนวณปริมาณมวลไร้ไขมันในร่างกาย (Fat free mass) โดยใช้เครื่อง bioelectrical impedance ในการศึกษาที่ได้ตั้งแต่ปี ค.ศ.1990 โดยบอกถึงกลุ่มประชากร จำนวนประชากร เครื่องมือที่ใช้วัด วิธีวัดมาตรฐาน สมการที่ใช้ในการคำนวณ และความสัมพันธ์ของวิธีการวัดทั้งสองวิธี

Comments	n	Criterion measure	Equation	r2	BIA instrument
Elderly	294	DXA	Women:7.7435+0.4542Ht2/R50+0.1190weight+0.0455Xc	0.77	RJL-101
Elderly, 65-94 Yr	98	Multi-C	-1.732+0.28Ht2/R50+0.27weight+4.5sex+0.31 thigh circ	0.91	RJL-101
Elderly	106	4 compart	11.78+0.499Ht2/R50+0.134weight+3.449 sex	0.91	RJL-101
Elderly, 60-83 Yr	72	Densutometry	7.0+0.360Ht2/R50+4.5sex+0.359weight-0.20thigh circ	0.92	RJL-101
Elderly, 60-83 Yr	72	Densutometry	3.9+0.672Ht2/R50+3.1Sex	0.88	RJL-101
Elderly	98	Densutometry	15.44+0.34Ht2/R50+0.36weight+4.3 sex-0.57ankle circ	0.87	RJL-101
Elderly	161	DXA	Men:9.1536+0.4273Ht2/R50+0.1926weight+0.0667Xc	0.72	RJL-101
Elderly	445	DXA	5.741+0.4551Ht2/R50+0.1405weight+0.0573Xc-6.2467sex		RJL-101

BIA equations are shows in order of increasing standard error estimate(SEE). Thay are limited to studies in healthy subjects that include at ;east 40 subjects and are validated against a criterion measure

*RSME, root mean square error; R, resistance;Ht2/R, height2/resistance, Xc, reactance; V, body volume;Z, impedance;Z2, impedance at 5kHz;Z100,impedance at 100kHz; 1for men,0 for women, unless otherwise stated, NR, not reported, height in cm, weight in kg, thigh circumference in cm, resistance in ohm, reactance).RJL Systems, Inc, Clinton Twp, MI; Xitron Technolgies, San Diego, CA; Valhalla Scientific, San Diego, CA;BIA-2000-M, Data Input, Hofheim, Germany;IMP BO-1,(2 subcutaneous electrodes),l'Impulsion, Caen,

France.All subjects are Caucasian, except jakicic (Caucasian and African-American),Stolarczyk et al. (Native American),Stolarczyk et al. (Native American), and Sun (Caucasian and African-American).

+%BF=((4.570/body densty)-4.142)100.

+

+%BF=(4.95/body density)-4.5)100.

s

S%BF=(6.38/ body density)-3.961 bone mineral mass-6.090)100.

¶%BF=((1.34/body density)-0.35+0.56 mineral content-1)205

ตารางที่ 3 แสดงสมการเพื่อคำนวณปริมาณน้ำในร่างกายในร่างกาย (TBW) โดยใช้เครื่อง bioelectrical impedance ในการศึกษาที่ได้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 โดยบอกถึงกลุ่มประชากร จำนวนประชากร เครื่องมือที่ใช้วัด วิธีวัดมาตรฐาน สมการที่ใช้ในการคำนวณ และความสัมพันธ์ของวิธีการวัดทั้งสองวิธี

Comments	n	Criterion measure	Equation	r2	BIA instrument
Healthy subjects	139	2H2O	6.69+0.34573Ht2/Z100+0.17065 weight-0.11 age+2.66 sex	0.95	Human-IM scanner
Healthy subjects	139	2H2O	6.53+0.36740Ht2/Z50+0.17531weight-0.11 age +2.83 sex	0.95	
Healthy subjects	60	2H2O	0.6+0.50Ht2/R0+0.186weight		SEAC
Healthy subjects, 35-65 Yr	139	Multi C, 2H2O, TBK	-17.58+0.240Ht2/R50-0.172weight+0.040 sex weight+0.165 height	0.85	RJL-103
Healthy subjects, ethnic divers	206	2H2O	Men=(-3.66+0.58(Ht2/Z501.0/10.35) +0.32 weight)	0.83	RJL-101
Healthy subjects, ethnic divers	126	2H2O	Women=(-0.86+0.76(Ht1.99/Z50 1.0/18.91)+0.14 weight	0.67	RJL-101
Healthy subjects, 17-66 Yr	40	2H2O	Men=8.399+0.396Ht2/R50+0.143 weight	0.95	RJL-101
Healthy subjects, 17-66 Yr	40	2H2O	Women=8.315+0.382Ht2/R50+0.105 weight	0.96	RJL-101

ของสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3 แสดงสมการเพื่อคำนวณปริมาณน้ำในร่างกายในร่างกาย (TBW) โดยใช้เครื่อง bioelectrical impedance ในการศึกษาที่ได้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 โดยบอกถึงกลุ่มประชากร จำนวนประชากร เครื่องมือที่ใช้วัด วิธีวัดมาตรฐาน สมการที่ใช้ในการคำนวณ และความสัมพันธ์ของวิธีการวัดทั้งสองวิธี

Comments	n	Criterion measure	Equation	r2	BIA instrument
Healthy subjects, 12-94 Yr	734	Multi-C	Men:1.203+0.449Ht2/R50+0.176weight	0.84	RJL-101
Healthy subjects, 12-94 Yr	1095	Multi-C	Women:3.747+0.450Ht2/R50+0.113weight	0.79	RJL-101
Elderly subjects	58	18O	3.026+0.358Ht2/R50+0.149weight+2.924sex	0.97	Analycor3
Elderly subjects	58	18O	2.896+0.366Ht2/R100+0.137weight+2.485sex	0.97	Analycor3
Healthy subjects, 19-65 Yr	60	2H2O	14.0107+0.29753Ht2/R224+0.14739 weight-3.63734 sex(men=0,women=1)-0.07299age	0.86	Xitron
Elderly, 63-87 Yr	117	2H2O	Men=8.3+0.3228Ht2/Z50+0.1652weight Women=11.9+0.2715Ht2/Z50+0.1087weight	0.66 0.41	Xitron
Healthy non-obese and obese subjects	90	2H2O	0.08+0.458Ht2/Rtbw+0.06weight	0.91	Xitron
Obese women	55	2H2O	23.1898+0.0154(VIZ1)+0.3315VI((Z1Z100)/(Z1-Z100	0.94	Xitron
Surgical patients	43	2H2O	5.82+0.446Ht2/R50+0.129 weight 5.69+0.399 Ht2/R50+0.114 weight -1.04+0.45 Ht2/R500+0.46APT+0.0119Ht2/Xc50-0.0106Ht2/Xc500	0.90 0.90 0.93	Xitron

TBK, total body potassium; $^{3}H_2O$, triterium; $^{2}H_2O$, deuterium oxide

RJl Systems, Inc, Clinton Twp, <L; Xitron Technologies, San Diego,CA; Human-IM Scanner, Dietosystem, Milan, Italy; Analycor3, Spengler, France SEAC, Brisbane, Australia.

*RMSE, root ,mean square error; R, resistance; Ht2/ R,height2/ resistance;Xc, reactance;V, body volume; Z, impedance; APT, maximum thickness long full length of sternum, measured with calipers; RTBW=(RICW RECW)/RICW+ RECE);Z5, impedance at 5 kHz;Z100 impedance at 100 kHz;1 for men, 0 for women, unless otherwise stated

ตารางที่ 4 แสดงสมการเพื่อคำนวณปริมาณน้ำนอกเซลล์ (ECW) โดยใช้เครื่อง bioelectrical impedance ในการศึกษาที่ได้ตั้งแต่ปีค.ศ. 1990 โดยบอกถึงกลุ่มประชากร จำนวนประชากร เครื่องมือที่ใช้วัด วิธีวัดมาตรฐาน สมการที่ใช้ในการคำนวณ และความสัมพันธ์ของวิธีการวัดทั้งสองวิธี

Comments	n	Criterion measure	Equation	r2	BIA instrument
Healthy subjects	139	KBr	2.30+0.19528 Ht2/Z1+0.06987weight-0.02 age	0.87	Human-IM
Healthy subjects	139	KBr	2.53+0.18903Ht2/Z5+0.06753 weight-0.02 age	0.86	scanner
Healthy subjects, 19-65 Yr	60	NaBr	0.17753+0.09989Ht2/R224+0.09322weight-1.3962sex(men=0,women=1)	0.92	Xitron
Healthy22and ill subjects18	40	NaBr	-7.24+0.34Ht2/R1+0.06 weight +2.63(health=1.ill=2)+2.57sex(men=0, women=1)	0.89	RJL-101 and 103
Healthy22and ill subjects18	40	NaBr	-5.22+0.20Ht2/R50+0.005Ht2/Xc50+0.08weight +1.9(healthy=1,ill=2)+1.86 sex(men=0,women=1)	0.89	RJL-101 and 103
Healthy non-obese And obese subjects	90	NaBr	-3.511+0.651Ht2/Recw+0.05 weight	0.77	Xitron
Healthy subjects	60	NaBr	-6.3+0.352 Ht2/R0+0.099 weight +3.09Sex(0=male,1=female)	0.7	SEAC
Healthy subjects	60	NaBr	1.2+0.194Ht2/R0+0.115 weight	0.65	SEAC
Healthy subjects	60	NaBr	-5.3+0.480Ht2/R0+3.5 sex(0=male, 1=female)	0.66	SEAC
Elderly,63-87 yr	117	KBr	Men=4.8+0.2249 Ht2/Z5 Women=1.7+0.1998 Ht2/Z5+0.0571 weight	0.39 0.65	Xitron
Surgical patients	43	NaBr	5.75+0.01Ht2/Xc50+0.165Ht2/R5	0.87	Xitron
Surgical patients	43	NaBr	6.15+0.0119 Ht2/Xc50+0.123Ht2/R50	0.87	Xitron

R, resistance;Ht2/R, height2/resistance ; R ecw, Resistance by cole –cole plot;Xc reactance; V, body volum;Z5, impedance at 5 kHz;Z100; impedance at kHz;1 for men, 0 for women, unless otherwise stated.

NaBr=sodium bromide, KBr=Potassium bromide.

Human-IM Scanner, Dietosystem, Milan, Italy; Xitron Technolofies, San Diego , CA;RJL Systems,Inc, Twp, MI; SEAC Brisbane, Australia.

ตารางที่ 5 แสดงสมการเพื่อคำนวณปริมาณน้ำในเซลล์ (ICW) โดยใช้เครื่อง bioelectrical impedance ในการศึกษาที่ได้ตั้งแต่ปีค.ศ. 1990 โดยบอกถึงกลุ่มประชากร จำนวนประชากร เครื่องมือที่ใช้วัด วิธีวัดมาตรฐาน สมการที่ใช้ในการคำนวณ และความสัมพันธ์ของวิธีการวัดทั้งสองวิธี

Comments	n	Criterion measure	Equation	r2	BIA instrument
Elderly,60-80 yr	159	TBK	9.182+0.285 Ht2/Zs+7.114PA6+2.113sex (1 for men, 2 for women)	0.93	BIA2000-M
Healthy men, 23-53 Yr	57	TBK	12.2+0.37065Ht2/Ricw+0.105weight-0.132 age	0.86	scanner

TBK, total body potassium; Ricw intracellular resistance; Ht2/Z, Height2/impedance at 5 kHz;

PA6, phase angle at 5 kHz;

Xitron Technolofies, San Diego; BIA2000-M, Data Input, Hothein, Germany

ตารางที่ 6 แสดงสมการเพื่อคำนวณปริมาณน้ำนอกเซลล์ (ECW) ในการศึกษาที่ได้ตั้งแต่ปี 1990 โดยใช้เครื่อง bioelectrical impedance โดยบอกถึงกลุ่มประชากร จำนวนประชากร เครื่องมือที่ใช้วัด วิธีวัดมาตรฐาน สมการที่ใช้ในการคำนวณ และความสัมพันธ์ของวิธีการวัดทั้งสองวิธี

Comments	n	Criterion measure	Equation	r2	BIA instrument
Elderly,60-90 yr	160	TBK	1.898Ht2/XCP60-0051 weight+4.180sex+15.496 (1 for men, 2 for women)	0.84	BIA2000
Elderly,60-90 yr	160	TBK	1.118Ht2/RI6/50+4.250sex+14.457 (1 for men, 2 for women)	0.84	BIA2000
Elderly,60-90 yr	160	TBK	0.822Ht2/RI6/100+4.185sex+14.096 (for men, 2 for women)	0.84	BIA2000

ตารางที่ 6 (ต่อ) แสดงสมการเพื่อคำนวณปริมาณน้ำนอกเซลล์ (ECW) ในการศึกษาที่ได้ตั้งแต่ปี 1990โดยใช้เครื่อง bioelectrical impedance โดยบอกถึงกลุ่มประชากร จำนวนประชากร เครื่องมือที่ใช้วัด วิธีวัดมาตรฐาน สมการที่ใช้ในการคำนวณ และความสัมพันธ์ของวิธีการวัดทั้งสองวิธี

Comments	n	Criterion measure	Equation	r2	BIA instrument
Healthy , ethnic diverse	206	TBK	Men=1/120((0.76(59.06Ht1.6/XCP50)+(18.52weight)-386.66)	0.83	RJL-101
Healthy , ethnic diverse	126	TBK	women=1/120((0.96(1.3Ht207/XCP50)+(5.79weight)-230.51)	0.56	RJL-101

TBK, total body potassium; R, resistance; Ht1.6/XCP50, height2/ parallet resistant at 50 kHz

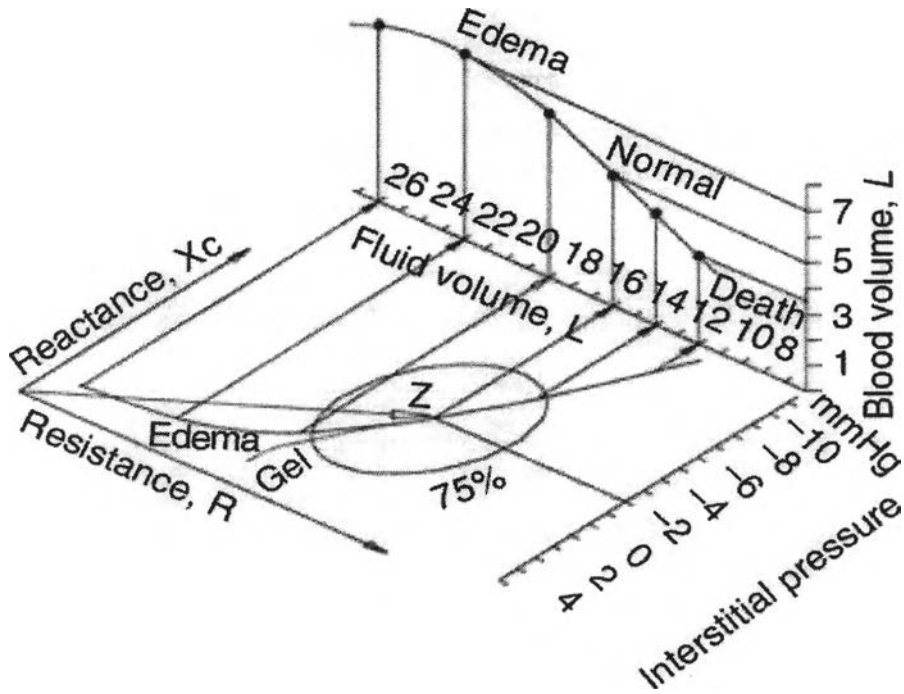
BIA2000-M, Data Input, Hothein, Germany, RJL Systems,Inc, Twp, ML.

ข้อจำกัดของการใช้สมการที่ในการคำนวณหาส่วนประกอบของร่างกาย คือที่มาของสมการเป็นการรวบรวมในกลุ่มประชากรที่ปกติ ดังนั้นในกลุ่มประชากรที่แตกต่างกันทั้งในแง่เชื้อชาติ เพศ อายุ กิจวัตรประจำวัน และการเจ็บป่วย ซึ่งมีผลต่อโปรตีนในร่างกายหรือปริมาณน้ำในร่างกาย การใช้สมการในการคำนวณอาจไม่สามารถใช้แทนในกลุ่มประชากรที่แตกต่างกัน ทำให้ผลของการคำนวณส่วนประกอบของร่างกายจากสมการมีความคลาดเคลื่อนไป โดยเฉพาะกลุ่มประชากรที่มีความผิดปกติของภาวะโภชนาการ หรือสารน้ำและเกลือแร่ในร่างกาย เช่น ภาวะอ้วนมาก ภาวะไตวายเรื้อรัง ภาวะหัวใจวาย(heart failure) ภาวะตับแข็ง(cirrhosis) หรือโรคของกล้ามเนื้อลีบ (muscular dystrophy)[45] ดังนั้นการใช้สมการคำนวณส่วนประกอบของร่างกายจากค่าทางไฟฟ้าที่ได้จากเครื่อง bioelectrical impedance ในผู้ป่วยกลุ่มนี้ต้องใช้ความระมัดระวัง นอกจากนี้ความแตกต่างของเครื่องมือที่ใช้และวิธีการวัดเช่นความถี่ของกระแสไฟฟ้าและตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าที่ติดยังคงมีผลต่อความแม่นยำของการคำนวณส่วนประกอบของร่างกาย[46]

2.5 แกน vector ของค่า bioelectrical impedance

มีความพยายามนำ ระดับแกน vector ของค่า bioelectrical impedance ซึ่งได้จากค่าความต้านทาน (resistant; R) และค่าการเก็บประจุ (reactant; Xc) ดังแสดงในรูปที่ 12 เพื่อบ่งบอกถึงภาวะของระดับน้ำในร่างกาย (fluid status) โดยวิธีนี้ยังคงต้องเปรียบเทียบลักษณะแกน vector กับลักษณะแกนของกลุ่มประชากรปกติ [47,48] โดยในกลุ่มประชากรปกติจะมีการกระจายตัวของขนาดและทิศทางของ vector ในลักษณะวงรี โดยมีค่าปกติเมื่อตกอยู่ในการกระจายร้อยละ 75 เมื่อขนาดหรือทิศทางของ vector มาประเมินส่วนประกอบของร่างกาย โดยเมื่อขนาดและทิศทางของ

vector มีลักษณะต่ำกว่าปกติแสดงถึงภาวะทุโภชนาการ ถ้าขนาดและทิศทางสั้นกว่าจะแสดงถึงภาวะน้ำในร่างกายมากกว่า

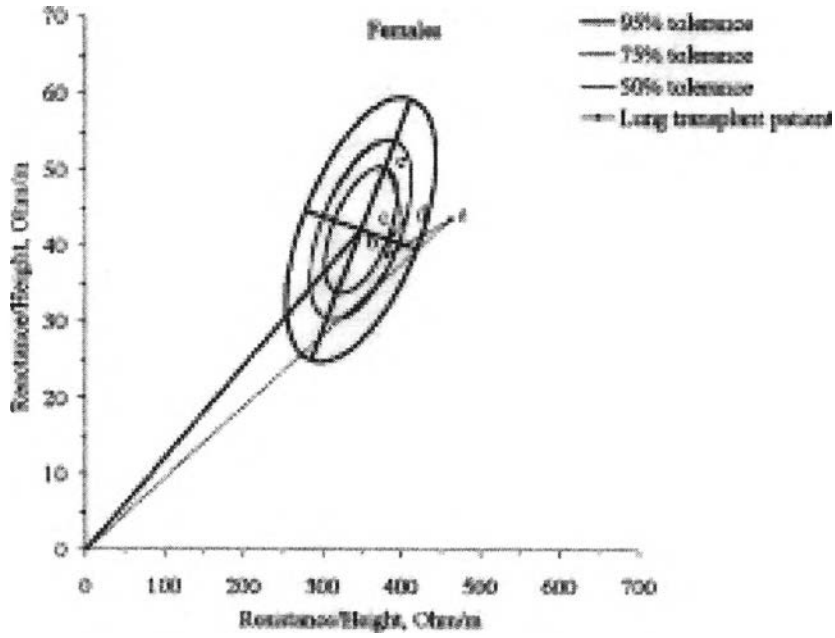


รูปที่ 12 แสดงระดับแกน vector ของค่า bioelectrical impedance (Z) ตามระดับน้ำในร่างกาย

เมื่อภาวะของระดับน้ำในร่างกายอยู่ในเกณฑ์ปกติ แกน vector ของค่า bioelectrical impedance(Z) จะอยู่ใกล้เคียงกลุ่มคนปกติ หากมีภาวะน้ำในร่างกายขาดหรือเกินจะมีลักษณะของแกน vector ผิดปกติ โดยจะมีความชันและความยาวสั้นลง ในแง่ของภาวะโภชนาการจะเปลี่ยนแปลตามทิศทางของ vector คือเมื่อ vector มีความชันลดลงจะสัมพันธ์กับภาวะทุโภชนา ดังรูปที่ 8 ซึ่งการหาขนาดและทิศทางของ vector ยังคงจำเป็นต้องรวบรวมข้อมูลในประชากรเพื่อหาค่าและทิศทางของประชากรปกติซึ่งยังคงมีความแตกต่างของ vector ในประชากรกลุ่มที่มีความแตกต่างกันทั้งในแง่ เพศ เชื้อชาติ อายุ และความเจ็บป่วย มีการกระจายของ vector ในลักษณะวงรี และหากมีขนาดและทิศทางที่ผิดปกติตั้งแต่ ร้อยละ 75 ขึ้นไปถือว่ามีความผิดปกติ ข้อดีของวิธีนี้ ไม่จำเป็นต้องใช้สมการในการคำนวณค่าต่างๆ และมีความแม่นยำสูง สำหรับประเทศไทยยังไม่มีข้อมูลแสดงถึงขนาดและทิศทางของ vector ในกลุ่มประชากรปกติ

มีการนำแกน vector ของค่า bioelectrical impedance มาใช้เพื่อประเมินส่วนประกอบของร่างกายในผู้ป่วยโรคต่างๆ ได้แก่ ผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือด[49] หรือฟอกไตทางหน้าท้อง (CAPD)[50] ผู้ป่วยที่มีภาวะน้ำและเกลือแร่ผิดปกติเช่น กลุ่มอาการเนพโฟรติก (nephritic syndrome)[50] พบว่าผู้ป่วยที่มีความผิดปกติของแกน vector ของค่า bioelectrical impedance จะมีอัตราการเสียชีวิตสูงกว่ากลุ่มที่มีแกน vector ปกติ[49] นอกจากนี้ระดับแกน vector ของค่า

bioelectrical impedanceยังสามารถบอกถึงภาวะความเจ็บป่วยและความแข็งแรงของร่างกายได้ ดังแสดงในรูปที่ 13

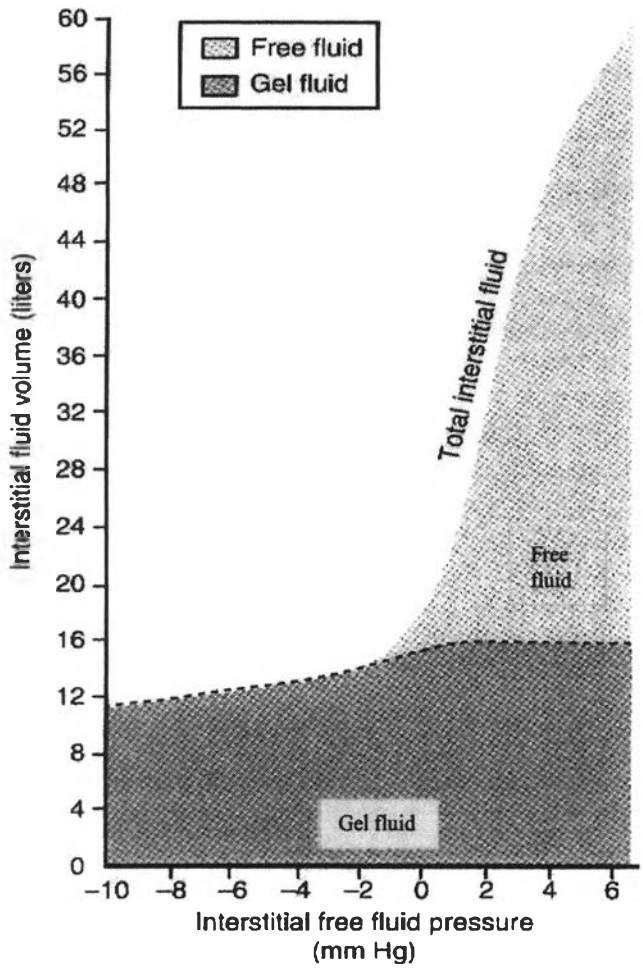


รูปที่ 13 แสดงระดับแกน vector ของค่า bioelectrical impedance (BIAV) ของผู้ป่วยผ่าตัดเปลี่ยนปอด โดยวงของวงรีที่ร้อยละ 50, 75, 95 ของประชากรตามลำดับ และวัด BIAV ที่ 1เดือน (a), 6เดือน (b), 12เดือน (c), 18เดือน (d) และ 24 เดือน (e) ในช่วงแรก(a) BIAV มีขนาดและทิศทางที่แสดงถึงภาวะ ทุโภชนาและมีภาวะน้ำเกิน หลังเปลี่ยนปอดผู้ป่วยมี BIAV ทิศทางที่ไดใกล้เคียงกลุ่มปกติตามระยะเวลาทั้งในแง่ภาวะโภชนาการและภาวะน้ำในร่างกาย (b-e) ซึ่งผู้ป่วยมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นจาก 54.2 เป็น 68.8 (เพศหญิง, ส่วนสูง 156 ซม. และอายุ 47 ปี)

2.6 การใช้เครื่อง bioelectrical impedance ในผู้ป่วยไตวายเรื้อรัง[45]

การใช้เครื่อง bioelectrical impedance เพื่อตรวจหาสัดส่วนของร่างกาย โดยใช้ทฤษฎี mixing และใช้สมการในการคำนวณ หรือการใช้ vector ของค่า bioelectrical impedance จะต้องอาศัยข้อมูลของกลุ่มประชากรปกติ และกลุ่มประชากรที่นำมาตรวจควรมีลักษณะใกล้เคียงกับกลุ่มประชากรปกติ แต่ในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังมีแนวโน้มที่จะมีภาวะน้ำในร่างกายเกินและภาวะทุโภชนาการ ทำให้การแทนที่สูตรตามสมการหรือการใช้ vector มีข้อจำกัด มีการใช้เครื่อง bioelectrical impedance ในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังมานานกว่า 20 ปี ทั้งในแง่การตรวจหาระดับการกระจายตัวของน้ำในร่างกายหรือในแง่โภชนาการ แต่การใช้ข้อมูลเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดและยังไม่มีข้อมูลที่แสดงถึงค่าปกติในกลุ่มประชากรในประเทศไทย

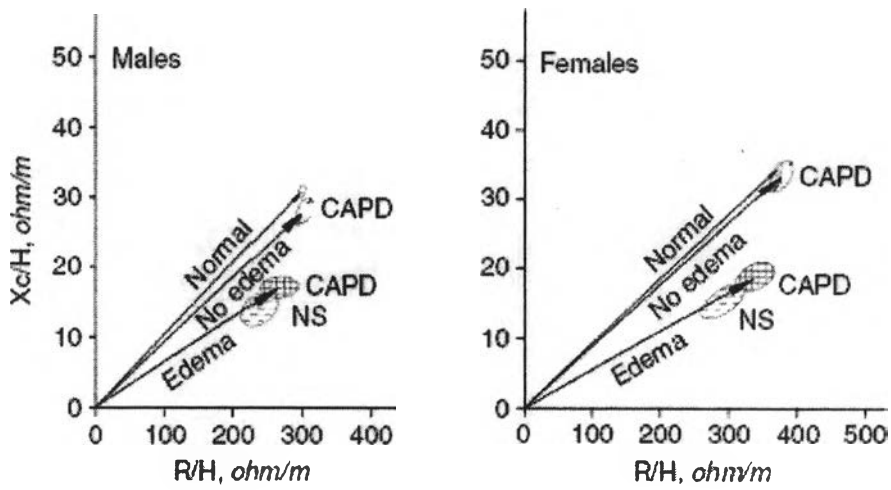
ผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่มีภาวะน้ำเกิน (overhydration) ก่อนการฟอกเลือดซึ่งเป็นผลจากการสูญเสียหน้าที่ในการขับถ่ายน้ำและเกลือส่วนเกินของร่างกาย ผู้ป่วยจะมีความดันโลหิตสูง และอาการบวมตามร่างกาย ซึ่งการกระจายตัวของน้ำที่เกินในผู้ป่วยกลุ่มนี้จะอยู่บริเวณนอกเซลล์ ในขณะที่ปริมาณน้ำในเซลล์ไม่แตกต่างไปจากกลุ่มประชากรปกติ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำนอกเซลล์เป็นสาเหตุทำให้เกิดความดันโลหิตสูงและอาการบวมตามมา ตามทฤษฎีของ Guyton [51]ในภาวะปกติ ความดันในเนื้อเยื่อบริเวณใต้ผิวหนัง จะมีค่าต่ำกว่าความดันชั้นบรรยากาศเล็กน้อย ประมาณ -2 ถึง -3 มิลลิเมตรปรอท จะทำให้มีปริมาณน้ำในชั้น interstitium ทั่วร่างกายประมาณ 12 ลิตร น้ำนี้จะมีลักษณะเป็นเจล ลักษณะนี้ทำให้ไม่เกิดภาวะบวมถึงแม้จะมีน้ำอยู่ปริมาณ 12 ลิตร เมื่อความดันภายในชั้นเนื้อเยื่อ interstitium มีค่าสูงขึ้น ทำให้เนื้อเยื่อบริเวณ interstitium มีปริมาณน้ำสูงขึ้น ถึงแม้ว่าจะมีความดันสูงขึ้นประมาณ 2-4 มิลลิเมตรปรอท แต่สามารถทำให้น้ำในบริเวณนี้เพิ่มขึ้นได้ 3-5 เท่า ซึ่งน้ำในชั้น interstitium จะมีลักษณะเป็นของเหลว (free fluid) ทำให้ผู้ป่วยจะมีภาวะบวมน้ำ ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 แสดงผลของการเพิ่มความดันในชั้น interstitium ต่อปริมาณและลักษณะของน้ำในชั้น Interstitial

การใช้เครื่อง bioelectrical impedance ในประชากรปกติ ลักษณะและค่าของ bioimpedance จะมีลักษณะปกติ ดังรูปที่ 15 เมื่อระดับใน interstitium มีปริมาณมากขึ้นและมีคุณสมบัติเป็น free fluid ค่าของ impedance, resistant และreactant ที่วัดได้จะน้อยกว่าค่าของประชากรปกติที่มีลักษณะเดียวกันเช่น เพศ อายุ และเชื้อชาติ เมื่อใช้ vector ของค่า impedance[50] จะพบว่ามีขนาดและทิศทางที่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ของประชากรปกติ ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับของค่า bioimpedanceและvector ของผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่มีภาวะน้ำและเกลือคั่ง คือมีอาการบวม

การวัดค่า bioelectrical impedance หรือการใช้ vector เพื่อประเมินการกระจายตัวของน้ำและปริมาณของน้ำในร่างกายในผู้ป่วยไตวายที่ยังมีการทำงานไตเหลืออยู่ (mild to moderate renal failure) คือไม่มีภาวะน้ำเกิน และไม่มีอาการบวม พบว่ามีค่าและลักษณะของ vector ใกล้เคียงกับคนปกติ แสดงถึงปริมาณน้ำนอกเซลล์ ไม่แตกต่างจากคนปกติ[50] ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 แสดงลักษณะ vector ที่ได้จากการใช้เครื่อง bioelectrical impedance ของผู้ป่วยที่มีสภาวะของน้ำในร่างกายแตกต่างกัน

- normal แทนกลุ่มประชากรปกติ
- no edema คือผู้ป่วยไม่มีภาวะบวม
- CAPD คือผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ฟอกไตทางหน้าท้อง
- NS คือผู้ป่วย nephrotic syndrome

ในผู้ป่วย CAPD ที่ไม่มีอาการบวมลังเกตว่าลักษณะ vector ไม่แตกต่างจากกลุ่มประชากรปกติ ในขณะที่กลุ่มที่ภาวะบวมทั้งกลุ่มของ CAPD และ NS จะมีลักษณะ vector ที่มีทิศทางและขนาดลดลง

2.7 การใช้เครื่อง bioelectrical impedance ในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือด

วัตถุประสงค์ในการใช้เครื่อง bioelectrical impedance ในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่รับการฟอกเลือดคือ เพื่อประเมินปริมาตรสารน้ำทั่วร่างกาย(volume)[16] เพื่อประเมินภาวะทางโภชนาการ และเพื่อประเมินน้ำหนักแห้งของผู้ป่วยฟอกเลือด ในบทความนี้จะกล่าวถึงการประเมินน้ำหนักแห้งจากเครื่อง bioelectrical impedance

2.7.1 การใช้เครื่อง bioelectrical impedance ในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือดเพื่อประเมิน สารน้ำทั่วร่างกาย[23,52]

มีการประเมินปริมาณน้ำในร่างกายของผู้ป่วยไตวายเรื้อรังหลายวิธี การใช้เครื่อง bioelectrical impedance ในการประเมินปริมาณน้ำในร่างกายผู้ป่วยไตวายเรื้อรังเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเนื่องจากมีความสะดวก สามารถวัดได้ง่าย และมีค่าที่ถูกต้องแม่นยำ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานคือ วิธีทางรังสีนิวเคลียซึ่งเป็นวิธีมาตราฐานแต่ยากต่อการปฏิบัติ และมีความแม่นยำมากกว่าในวิธีอื่น เช่นการใช้สูตรคำนวณ ของ Watson. Hume และChertow [17]

จึงมีการนำเครื่อง bioelectrical impedance ใช้วัดน้ำหนักแห้งในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือด ดารใช้เครื่องมือนี้จึงเป็นวิธีใหม่ในการวัดน้ำหนักแห้ง ซึ่งจะได้กล่าวถึงวิธีการวัดต่อไป

2.7.2 การใช้เครื่อง bioelectrical impedance ในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือดเพื่อประเมินภาวะโภชนาการ[14,15,45,53-55]

มีการนำค่า bioelectrical impedance มาใช้ในการประเมินภาวะโภชนาการ โดยพบว่า ค่า Phase angle จะสัมพันธ์กับปริมาณโปรตีนบนผิวเซลล์ในประชากรทั่วไป เช่นเดียวกับผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือด ค่า Phase angle จะสามารถแสดงถึงการทำนายโรคซึ่งสัมพันธ์กับภาวะโภชนาการในผู้ป่วยกลุ่มนี้ ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การศึกษาซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่า Phase angle และ อัตราการตายของผู้ป่วยไตวายเรื้อรังกลุ่มต่างๆ

Subject group	n	BIA parameter	Instrument	Comments
hemodialysis	131	PhA	RJL	Patients with PhA in lowest quartile (men < 4.5°, women < 4.2°) had significant lower 2 year survival (51.3% versus 91.3%)
Peritoneal dialysis	45	PhA	RJL	Patients with PhA >6.0° had significant longer survival(P=0.01)
Chronic renal failure	46	PhA	RJL	Decline in PhA was associated with reduce survival, even when biochemical markers were unchanged. Mortality was 28% in patients with PhA < 3° versus 3% with PhA > 3°

PhA, Phase angle; RJL Systems,Inc, Twp, ML.

2.8 **วิธีการประเมินน้ำหนักแห้งในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือด**[1,2]

มีการพยายามนำเครื่องมือหรือการตรวจทางห้องปฏิบัติการ หลายชนิดมาใช้ เพื่อประเมินน้ำหนักแห้งในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือด ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงวิธีการหาน้ำหนักแห้งในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่รับการฟอกเลือด

Technique	Benefits	Limitations
Biochemical markers	Ease of use No additional labor cost Highly sensitive for the volume overloaded state Reflective of intravascular volume status	Difficult to use in heart failure, tricuspid/mitral valve disease Cannot detect the "underhydrated" state "Normal" range? Meaning of low value?
Vena cava diameter	Widely available Reflective of intravascular volume status Change in size correlates well with ultrafiltration volume/ hemodynamic parameters	Difficult to use in heart failure Overestimates degree of dehydration postdialysis Interoperator error Highly variable/difficult to normalize to population
Bioimpedance	Hydric volumes correlate well with isotope dilution methods Ease of use, immediate results Reproducible/repeatable Measurement of interstitial space and ICF Immediate assessment of nutritional status Has potential to be readily normalized Continuous/hemodynamic and static/dry weight utility Sensitive in detecting the underhydrated state	Postdialysis measurements of ECF often underestimate ultrafiltration volume Underestimates volume removed from trunk Accurate measurement of ICF confounded by temperature and ion effect Accurate measurement of ECF confounded by effect of recumbancy
Blood volume monitoring	Ease of use and understanding Allows for concomitant prevention of hypotension May be useful to screen for an inappropriately high or low dry weight	Continuous plasma volume dependent on numerous factors other than hydration of the interstitial space Measures relative volumes only Interpatient variability

[a] ECF, extracellular fluid; ICF, intracellular fluid.

2.8.1 **การใช้อาการและอาการแสดงเพื่อประเมินน้ำหนักแห้ง**[1,2,56]

การใช้อาการและอาการแสดงเพื่อประเมินภาวะของสารน้ำในร่างกาย (hydration status) เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากมีความสะดวก ไม่ต้องใช้เครื่องมือในการตรวจที่มากมาย แต่การประเมินน้ำในร่างกายด้วยวิธีนี้ต้องอาศัยความสามารถในการซักประวัติและตรวจร่างกายของแพทย์ผู้ดูแลเป็นสำคัญ ทำให้ความแม่นยำในการประเมินขึ้นกับความสามารถของแพทย์แต่ละท่านเช่นเดียวกัน

นอกจากนั้นอาการและอาการแสดงของผู้ป่วยอาจมีความไวและความจำเพาะเจาะจงแตกต่างกัน เช่น อาการแสดงของเส้นเลือดคอโป่งพองซึ่งเป็นอาการแสดงที่สำคัญในผู้ป่วยที่มีน้ำในร่างกายเกินจนเกิด pulmonary congestion อาจพบได้ในผู้อื่น เช่น ผู้ป่วยเยื่อหุ้มหัวใจอักเสบ และยังขึ้นกับปริมาณน้ำที่เกินในร่างกายผู้ป่วยหากผู้ป่วยมีน้ำเกินเล็กน้อยอาจไม่มีภาวะเส้นเลือดที่คอโป่งพองทั้งที่มีภาวะน้ำเกินอยู่ ในทางตรงข้ามภาวการณ์ลดลงของความดันโลหิตเมื่อเปลี่ยนท่าทางจากการนอนเป็นการยืน (othostatic hypotension) เป็นอาการแสดงที่บอกถึงภาวะน้ำในร่างกายขาด แต่การอาการแสดงนี้ยังเกิดได้บ่อยในภาวะอื่น เช่น ภาวะเส้นประสาทอัตโนมัติทำงานผิดปกติ (autonomic dysfunction) การใช้ยาความดันโดยเฉพาะยา alpha blocker ซึ่งพบบ่อยในผู้ป่วยไตวายเรื้อรัง

ถึงแม้ว่าการใช้อาการและอาการแสดงในการประเมินน้ำหนักแห้งมีความแม่นยำที่ต่ำ แต่เป็นวิธีที่มีความสะดวกและวิธีอื่นยังไม่มีวิธีที่เหมาะสมกว่า จึงเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดโดยจะประเมินภาวะน้ำหนักแห้งของผู้ป่วยไตวายเรื้อรังขณะฟอกเลือด โดยถือน้ำหนักตัวของผู้ป่วยขณะฟอกเลือดเสร็จที่ต่ำที่สุดที่ไม่มีอาการแสดงของภาวะน้ำขาด ได้แก่ ตะคริว หูอื้อ หรือความดันโลหิตต่ำ

2.8.2 การใช้ biochemical marker เพื่อประเมินน้ำหนักแห้ง[1,2]

มีการใช้ biochemical marker เพื่อประเมินภาวะน้ำเกินในร่างกาย เช่น atrial natriuretic peptide (ANP), brain natriuretic peptide (BNP), cyclic guanosine 3':5'-monophosphate (cGMP) ซึ่ง biochemical marker เหล่านี้จะมีความจำเพาะต่อภาวะน้ำในร่างกายเกิน โดยจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีภาวะน้ำในร่างกายเกิน

a) **ANP และ BNP**[57]

สารทั้งมี 2 ชนิดมีความสัมพันธ์กับภาวะน้ำในร่างกาย โดยพบว่าจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีภาวะน้ำในร่างกายเกิน ในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือดจะมีภาวะน้ำในร่างกายเกิน และจะขจัดน้ำออกจากร่างกายได้ด้วยวิธีฟอกเลือด Haug C และคณะ[58]ได้นำค่า ANP และ BNP มาประเมินภาวะน้ำในร่างกายของผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือด 30 ราย พบว่า ก่อนฟอกเลือดระดับ ANP และ BNP ของผู้ป่วยจะมีค่าสูง และเมื่อฟอกเลือดเสร็จระดับของ ANP และ BNP จะมีค่าลดลง

ในผู้ป่วยที่มีระดับสาร ANP และ BNP สูงนอกพบในผู้ป่วยที่มีภาวะน้ำเกิน ยังสามารถพบได้ในผู้ป่วยโรคหัวใจ ได้แก่ ภาวะหัวใจวาย หรือลิ้นหัวใจรั่วได้ ทำให้ความจำเพาะเจาะจงของสารนี้ลดลง และในผู้ป่วยที่มีภาวะน้ำในร่างกายปกติหรือมีภาวะขาดน้ำค่าของ ANP และ BNP จะไม่มีความแตกต่างกัน[59] ดังนั้นไม่สามารถนำค่าของ ANP และ BNP มาใช้เพื่อแยกภาวะทั้งสองได้ จึงเป็นข้อจำกัดในการนำมาใช้ในการประเมินน้ำหนักแห้งผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือด แต่

สามารถนำค่านี้ช่วยในการประเมินภาวะน้ำในร่างกายในกรณีของภาวะน้ำเกินและเพื่อใช้ในการประเมินการดำเนินโรค[1]

cGMP เป็นสารนำคำสั่ง (secondary messenger) เพื่อให้เกิดการหลั่ง natriuretic peptide ออกมาจากเซลล์1 ดังนั้นสารนี้จะสูงขึ้นเมื่อมีภาวะน้ำในร่างกายเกิน Lauster F และคณะ 60 ได้นำสารนี้มาใช้ช่วยประเมินน้ำหนักแห้งในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือด 81 ราย พบว่าระดับสาร cGMP ยังคงมีค่าสูงหลังฟอกเลือดในผู้ป่วย 21 ราย 13 รายในผู้ป่วยกลุ่มนี้มีภาวะ pulmonary congestion จากการประเมินด้วยการถ่ายภาพรังสีปอด เมื่อเพิ่มการขจัดน้ำมากขึ้นและน้ำหนักตัวของผู้ป่วยลดลงแล้ว ระดับสาร cGMP ลดลงเช่นเดียวกัน พบว่าไม่มีผู้ป่วยที่มีภาวะ pulmonary congestion จากการประเมินด้วยการถ่ายภาพรังสีปอด[60] แต่การนำสารนี้มาใช้ในการประเมินน้ำหนักแห้งในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือดยังมีความไวและความจำเพาะเจาะจงน้อยเช่นเดียวกับ atrial natriuretic peptide และ brain natriuretic peptide จึงทำให้วิธีนี้ได้รับความนิยมน้อย1

2.8.3 **การใช้ขนาดของ inferior vena cava เพื่อประเมินน้ำหนักแห้ง**[1,2]

ขนาดของ inferior vena cava ที่ตรวจได้มีความสัมพันธ์กับปริมาณสารน้ำในเส้นเลือด (intravascular volume) การตรวจหาขนาดของ inferior vena cava สามารถหาได้จากการตรวจด้วยเครื่องคลื่นเสียงความถี่สูง ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวก ไม่มีอันตรายต่อผู้ป่วย จึงเป็นวิธีที่นำมาใช้ในการประเมินภาวะของน้ำในร่างกาย (hydration status) โดยพบว่าขนาดของ inferior vena cava จะเปลี่ยนตามการหายใจ เมื่อหายใจเข้าจะมีขนาดโตขึ้น และเมื่อหายใจออกจะมีขนาดเล็กลง มีการนำอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของขนาด inferior vena cava กับการหายใจ(collapse index ; CI)มาประเมินภาวะของน้ำในร่างกาย ในผู้ป่วยที่มีน้ำในร่างกายสูงจะมีขนาดของ inferior vena cava สูง และมี collapse index สูง แต่หากมีภาวะน้ำในร่างกายต่ำจะมีขนาดของ inferior vena cava และ collapse index ต่ำ สามารถหา collapse index จากสมการ

CI =([IVCend expiratory- IVCend inspiratory]/IVCend expiratory)*100 สมการที่13

มีการนำขนาดของ inferior vena cava และ collapse index มาใช้ประเมินภาวะน้ำในร่างกายของผู้ป่วยไตวายเรื้อรังกว่า 15 ปี โดย Cheriex EC และคณะ[61] พบว่าในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่มีภาวะน้ำในร่างกายจะมีขนาด inferior vena cava มากกว่า 11.5 มิลลิเมตรต่อเมตร2 ของ body surface area และมี collapse index ที่สูงกว่าร้อยละ 75 (inferior vena cava มีขนาดเล็กลงเมื่อหายใจเข้าน้อยกว่าร้อยละ 25) หากมีภาวะน้ำในร่างกายน้อยจะมีขนาดinferior vena cava เล็กกว่า 8.0 มิลลิเมตรต่อเมตร2 ของ body surface area และมี collapse index ที่ น้อยกว่าร้อยละ 40 (inferior vena cava มีขนาดเล็กลงเมื่อหายใจเข้ามากกว่าร้อยละ 60) เมื่อนำวิธีนี้มาใช้ช่วยประเมิน

น้ำหนักแห้งในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือด พบว่าสามารถปรับปริมาณการขจัดน้ำและช่วยให้ ภาวการณ์ไหลเวียนโลหิต (hemodynamic)[62] ของผู้ป่วยดีขึ้นได้ และผู้ป่วยมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น

วิธีนี้มีข้อจำกัดคือ ในผู้ป่วยที่มีภาวะโรคหัววาย (congestive heart failure) มีภาวะหัวใจโต (cardiomegaly) หรือ มีภาวะลิ้นหัวใจห้องขวา (tricuspid dysfunction) จะมีความผิดปกติของความดันในหัวใจส่งผลต่อขนาดและการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นเลือด inferior vena cava ได้ซึ่งภาวะต่างๆเหล่านี้พบได้บ่อยในผู้ป่วยไตวายเรื้อรัง และยังไม่มีค่ามาตราฐานของขนาดของเส้นเลือด inferior vena cava ในประชากรปกติ นอกจากนี้การตรวจขนาดเส้นเลือด inferior vena cava ด้วยจะขึ้นกับความเชี่ยวชาญของแพทย์ผู้ตรวจ ความละเอียดของเครื่องมือที่ใช้ จึงไม่ได้รับความนิยมในการนำมาประเมินน้ำหนักแห้งในผู้ป่วยไตวายเรื้อรัง[1,61,63]

2.8.4 การวัดปริมาณเลือดระหว่างฟอกเลือด (blood volume monitoring) เพื่อประเมินน้ำหนักแห้ง

ปริมาณเลือดในเส้นเลือดเป็นน้ำในร่างกายที่อยู่ในส่วนของน้ำนอกเซลล์ ในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือดจะมีการลดลงของปริมาณเลือดขณะฟอกเลือด[64] หากปริมาณเลือดลดลงมากกว่าร้อยละ 16 จะส่งผลในเกิดความดันโลหิตต่ำได้ มีการใช้ปริมาณความเข้มข้นของโลหิตในเส้นเลือด (hematocrit) หรือระดับความเข้มข้นของโปรตีนในเส้นเลือด[65] มาใช้ประเมินปริมาณน้ำในกระแสเลือด (blood volume) โดยขณะฟอกเลือดจะมีการขจัดน้ำ แต่จะไม่มีการขจัดเม็ดเลือดแดงและโปรตีนขนาดใหญ่ ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของสารทั้ง 2 ชนิดสูงขึ้น การใช้คลื่นแสงเพื่อประเมินความเข้มข้นของโลหิตในระหว่างฟอกเลือดเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีความสะดวกและมีการใช้อย่างแพร่หลาย

Hector และคณะ ได้นำเครื่องแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นเลือด (Crit-Line) มาใช้เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเลือดในเส้นเลือดระหว่างทำการฟอกเลือด ในผู้ป่วยไตวายเรื้อรัง 28 ราย โดยดูการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเลือดในเส้นเลือดและจะถือว่าผู้ป่วยมีการขจัดน้ำจนได้น้ำหนักแห้งเมื่อ มีการลดลงของปริมาณเลือดในเส้นเลือดระหว่างฟอกเลือดสังเกตจากการมีความเข้มข้นของเม็ดเลือดเพิ่มขึ้น และปราศจากการเติมเลือดในเส้นเลือดจากน้ำนอกเซลล์ในส่วนอื่นซึ่งสังเกตจากการลดลงของความเข้มข้นเลือดโดยเฉพาะ 10 นาทีหลังหยุดการขจัดน้ำ และไม่มีอาการของการขาดสารน้ำในร่างกายเช่น ความดันโลหิตต่ำ ตะคริวระหว่างฟอกเลือดหรืออ่อนเพลียหลังฟอกเลือด พบว่ามีผู้ป่วย 19 รายที่สามารถลดน้ำหนักแห้งและเพิ่มการขจัดน้ำได้ และผู้ป่วย 13 รายจาก19 รายมีการลดน้ำหนักแห้งได้มากกว่า 1 กิโลกรัม ซึ่งผู้ป่วย 10 รายจาก 13 รายมีความดันโลหิตลดลงอย่างชัดเจน และมีอัตราการเข้ารักษาตัวในโรงพยาบาลจากภาวะน้ำท่วมปอด (pulmonary congestion) ลดลง[66]

ข้อจำกัดของการในวิธีนี้เพื่อประเมินน้ำหนักแห้งในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือดคือยังไม่มีค่ามาตรฐานของการลดลงของปริมาณน้ำในเส้นเลือด ซึ่งพบว่าเมื่อมีการขจัดน้ำจนได้

I 22763415

น้ำหนักแห้ง ปริมาณน้ำในเส้นเลือดจะลดลงแต่ในผู้ป่วยแต่ละรายมีความแตกต่างของปริมาณน้ำที่ลดลง ยังมีปัจจัยอื่นๆที่ส่งผลต่อการลดลงของปริมาณน้ำในกระแสเลือดระหว่างฟอกเลือดได้แก่ อุณหภูมิของน้ำยาฟอกไต ความเข้มข้นของเกลือแร่ในน้ำยาฟอกไต ภาวะความเจ็บอื่นของผู้ป่วยเช่น โรคเบาหวานหรือการมีภาวะเกลือแร่ในร่างกายผิดปกติ และเครื่องนี้จะแสดงความการเปลี่ยนแปลงของน้ำในเส้นเลือดซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของน้ำนอกเซลล์ ซึ่งน้ำนอกเซลล์เป็นน้ำในร่างกายที่เกินในผู้ป่วยไตวายเรื้อรัง และไม่มีข้อมูลแสดงถึงความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำในเส้นเลือดที่ได้จากวิธีนี้และน้ำนอกเซลล์ทั้งหมด นอกจากนี้การตรวจการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของโลหิตระหว่างฟอกเลือดยังต้องอาศัยเครื่องมือพิเศษซึ่งยังไม่แพร่หลายในปัจจุบัน[1,2]

2.9 การเปลี่ยนแปลงการกระจายของสารน้ำและค่า bioelectrical impedance ระหว่างฟอกเลือด

2.9.1 การเปลี่ยนแปลงการกระจายของสารน้ำในร่างกายระหว่างฟอกเลือด[67]

ผู้ป่วยไตวายเรื้อรังระยะสุดท้ายจะมีภาวะน้ำและเกลือเกินในร่างกาย การฟอกเลือดเป็นวิธีที่ขจัดน้ำและเกลือที่เกินในร่างกายซึ่งจะแสดงอาการโดยมีการคั่งของน้ำและเกลือบริเวณเนื้อเยื่อ ขณะที่ทำการฟอกเลือด จะมีการขจัดน้ำในบริเวณนอกเซลล์ โดยเฉพาะส่วนของน้ำในเส้นเลือดซึ่งเป็นส่วนที่ต่อโดยตรงกับเครื่องฟอกเลือด แต่จะมีน้ำจากบริเวณ interstitium แพร่กลับเข้าสู่เส้นเลือด (vascular refill) ทำให้มีการขจัดน้ำออกจากร่างกาย เมื่อฟอกเลือดจนถึงระดับหนึ่ง ผู้ป่วยไม่มีภาวะน้ำและเกลือเกิน แรงดันในบริเวณ interstitium จะมีค่าเป็นลบ และน้ำในบริเวณนั้นจะมีคุณสมบัติเป็นเจล ทำให้อัตราการแพร่ของน้ำเข้าสู่เส้นเลือดลดลง เมื่อขจัดน้ำเพิ่มจะเป็นการขจัดน้ำในเส้นเลือดทำให้ระดับน้ำในเส้นเลือดลดลง เกิดภาวะแทรกซ้อนได้แก่ ตะคริว หูอื้อ และความดันโลหิตต่ำได้ น้ำหนักตัวของผู้ป่วยฟอกเลือดขณะที่มีการขจัดน้ำและเกลือส่วนเกินออกจนถึงระดับที่ไม่มีภาวะน้ำเกินและไม่เกิดภาวะขาดน้ำคือน้ำหนักแห้ง มีการศึกษาติดตามในผู้ป่วยฟอกเลือดพบว่า เมื่อการฟอกเลือดขจัดน้ำส่วนเกินของร่างกายจนได้น้ำหนักแห้ง น้ำในบริเวณ interstitium จะเป็นบริเวณที่มีการขจัดน้ำออกมากที่สุด โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในเซลล์ และระดับน้ำในเส้นเลือด (plasma volume) จะลดลงประมาณร้อยละ 8 ซึ่งการลดลงของplasma volume จะก่อให้เกิดภาวะแทรกซ้อนอย่างที่กล่าวมาแล้ว การกระจายตัวของน้ำในร่างกายขณะที่มีการขจัดน้ำจนถึงน้ำหนักแห้ง จะมีปริมาณของน้ำนอกเซลล์คงที่ ดังนั้นการตรวจการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำนอกเซลล์ จะสามารถแสดงน้ำหนักแห้งในผู้ป่วยฟอกไตได้

2.9.2 การเปลี่ยนแปลงการของค่า bioelectrical impedance ระหว่างฟอกเลือดและหลังฟอกเลือด[68]

ระหว่างที่ทำการฟอกเลือดจะมีการขจัดน้ำออกจากร่างกายทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของค่า impedance, resistant และ reactant ซึ่งค่าทางไฟฟ้าทั้ง 3 ค่ามีความสัมพันธ์กับ ECW ที่เปลี่ยนแปลงจากการขจัดน้ำด้วยวิธีฟอกเลือด ดังที่แสดงใน ตารางที่ 9 จนมีค่าสูงสุดเมื่อฟอกเลือด

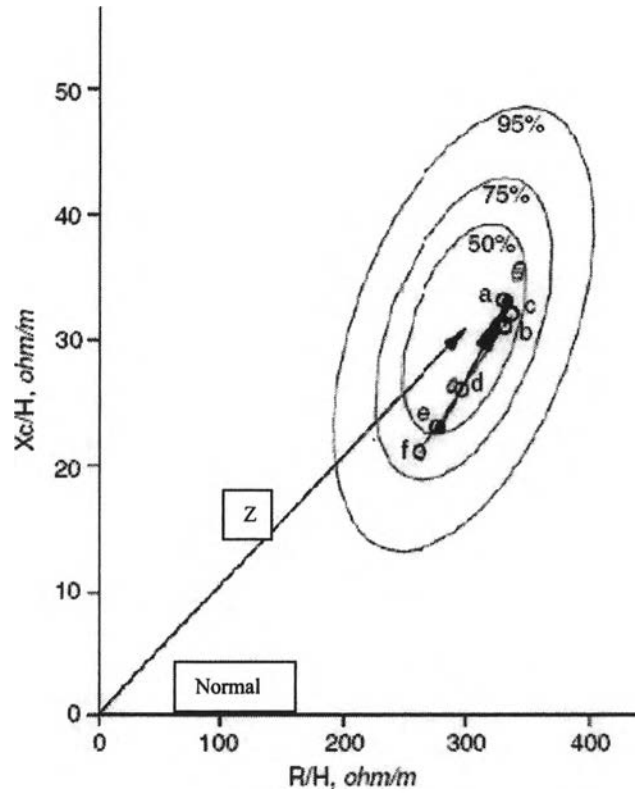
เสร็จ (น้ำหนักแห้ง) เมื่อผู้ป่วยรับประทานอาหารและน้ำจะเริ่มมีการคั่งของน้ำและเกลือ ทำให้ค่าทางๆไฟฟ้าลดลงจนได้รับการฟอกเลือดอีกครั้ง

ตารางที่ 9 แสดงความเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานและค่าการเก็บประจุก่อน และหลังฟอกเลือด

Time	Body weight *kg*	Resistance *ohm*	Reactance *ohm*
Start of dialysis	70.7 ± 12.3	453 ± 74[a]	38 ± 10[a]
End of dialysis	67.9 ± 12.0	542 ± 98	53 ± 16
Postdialysis			
15 minutes	67.9 ± 12.0	538 ± 94	53 ± 15
30 minutes	67.9 ± 12.0	539 ± 95	53 ± 15
60 minutes	67.9 ± 12.0	538 ± 94	51 ± 16
90 minutes	67.9 ± 12.0	541 ± 95	52 ± 16
120 minutes	67.9 ± 12.0	544 ± 95	52 ± 16
Interdialysis			
24 hours	69.3 ± 12.3	471 ± 79[a]	42 ± 13[a]
48 hours	70.5 ± 12.3	449 ± 71[a]	37 ± 10[a]
68 hours	71.3 ± 12.5	424 ± 68[a]	34 ± 10[a]

[a] $P < 0.05$ vs. end of dialysis.

ถ้านำค่าทางไฟฟ้ามา สร้างแกน vector ของค่า bioelectrical impedance ขณะได้รับการฟอกเลือดทิศทางและขนาดของแกน vector เข้าใกล้ประชากรปกติ ดังรูปที่ 16 และระยะหลังฟอกเลือดทิศทางและขนาดของ vector จะเปลี่ยนแปลงโดยมีลักษณะต่ำและสั้นลง คล้ายในผู้ป่วยที่มีภาวะน้ำเกินจนถึงเวลาฟอกเลือดอีก[49,69,70]



รูปที่ 16 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ vector ก่อนและหลังฟอกเลือด

Z คือ vector ของ impedance ในประชากรปกติ โดยมีการกระจายความปกติตามลักษณะเป็นวงรี ที่ percentile ที่ 50, 75 และ95 ตามลำดับของวงรี (ข้อมูลปกติของผู้ชายชาวอิตาลี) โดยa, b, c, d, e และ f คือปลายของ เมื่อฟอกเลือดเสร็จ 30 นาที 60นาที 120นาที 24 ชั่วโมง 48 ชั่วโมงและ 68 ชั่วโมง ตามลำดับ

2.10 การนำเครื่อง bioelectrical impedance มาใช้เพื่อประเมินน้ำหนักแห้ง

การศึกษาถึงระดับน้ำหนักแห้งของผู้ป่วยไตวายเรื้อรัง ที่ได้รับการฟอกเลือดโดยใช้ค่าที่ได้จากเครื่อง bioelectrical impedance นานกว่า 20 ปีมีวิธีการประเมินน้ำหนักแห้งจากเครื่อง bioelectrical impedance หลายวิธี แต่ยังไม่มีวิธีใดที่สามารถนำมาใช้หาน้ำหนักแห้งของผู้ป่วยกลุ่มนี้ได้อย่างเหมาะสม วิธีการประเมินน้ำหนักแห้งจากเครื่อง bioelectrical impedance ได้แก่

1) การวัดค่า bioelectrical impedance เพื่อหาปริมาณ body composition

2) การใช้ vector ของค่า bioimpedance(Z; จากค่าความต้านทาน(resistant; R) และค่าการเก็บประจุ (reactant; Xc)

3) การใช้ค่าความชันของการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำนอกเซลล์ โดยเปรียบเทียบกับคนปกติ

4) การใช้อัตราส่วนค่าความต้านทานก่อนฟอกเลือดและระหว่างฟอกเลือด

2.10.1 **การวัดค่า** bioelectrical impedance **เพื่อหาปริมาณ** body composition

ก. การใช้เครื่อง bioelectrical impedance **ประเมินสารน้ำนอกเซลล์** (ECW) **เพื่อประเมินน้ำหนักแห้ง**[71]

ผู้ป่วยไตวายเรื้อรังเมื่อได้รับการฟอกเลือดจนได้น้ำหนักแห้ง ปริมาณ extracellular fluid (ECW) โดยมีค่าใกล้เคียงกับค่า ECW ของประชากรปกติ [9,10] โดยใช้เครื่อง bioelectrical impedance วัดปริมาณ ECW โดยใช้ ทฤษฎี mixing และใช้สมการในการคำนวณอย่างที่ได้กล่าวมาแล้ว พบว่าวิธีนี้มีความแม่นยำ สามารถนำมาใช้เพื่อช่วยในการประเมินน้ำหนักแห้งในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือดโดยเฉพาะกลุ่มที่มีภาวะน้ำในร่างกายเกิน จะสามารถควบคุมความดันโลหิตและป้องกันภาวะแทรกซ้อนจากภาวะขาดน้ำได้ ข้อจำกัดของวิธีนี้ คือ ต้องอาศัยข้อมูลของประชากรปกติในการคำนวณปริมาณ ECW จากสมการ และยังอาศัยค่า ECW ของประชากรปกติเป็นข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบปริมาณ ECW ในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือด ซึ่งมีปัจจัยที่ทำให้ค่า ECW ทั้ง 2 กลุ่มมีความแตกต่างกันได้ เช่น ภาวะความเจ็บป่วยอื่น หรือภาวะโภชนาการ ดังนั้นการใช้เครื่อง bioelectrical impedance เพื่อหาน้ำหนักแห้งโดยวิธีนี้ ควรใช้ร่วมกับวิธีอื่น อัตราส่วนน้ำในร่างกายของประชากรปกติแสดงถึงปริมาณอัตราส่วนของ ECV ต่อ TBW ดังแสดงในตารางที่ 10 [72]

ตารางที่10 แสดงอัตราส่วนของปริมาณน้ำในร่างกายของประชากรปกติ

Compartment	Percent of Total Body Water	Percent of Total Body Weight	
		Normal Adult Man	Normal Adult Woman
Intracellular fluid	55	33	27.5
Extracellular fluid	45	27	22.5
Interstitial fluid	20	12	10
Plasma	7.5	4.5	3.75
Bone	7.5	4.5	3.75
Connective tissue	7.5	4.5	3.75
Transcellular	2.5	1.5	1.25
Total body water	100	60	50

[a] Adapted from Edelman and Leibman, 1959 (4).

Kouw และคณะ[71] ได้วิเคราะห์หาน้ำหนักแห้งในผู้ป่วยชาวเนเธอร์แลนด์ที่มีภาวะไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือดจำนวน 29 ราย โดยใช้การตรวจด้วยเครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบของร่างกายชนิดหลายความถี่ (multi-frequency bioelectrical impedance) และติดขั้วไฟฟ้าบริเวณ

ขา (calf) ทำการวัดค่า bioelectrical impedance เมื่อเริ่มต้นและเสร็จจากการฟอกเลือดและคำนวณหาปริมาณสารน้ำในร่างกายทั้งในส่วนของน้ำนอกเซลล์ (ECW) และน้ำในเซลล์ (ICW) โดยเปรียบเทียบกับการคำนวณปริมาณสารน้ำในร่างกาย โดยใช้ค่า bioelectrical impedance ของประชากรปกติชาวเนเธอร์แลนด์ พบว่าผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่มีภาวะน้ำเกินจะมีค่าปริมาณสารน้ำนอกเซลล์สูงกว่าปกติ ในกลุ่มที่มีภาวะขาดน้ำจะมีระดับสารน้ำนอกเซลล์ต่ำกว่าปกติและมักมีภาวะความดันโลหิตต่ำระหว่างการฟอกเลือด

ในขณะที่ Chen และคณะ[73]ได้วิเคราะห์หาน้ำหนักแห้งในผู้ป่วยชาวไต้หวันที่มีภาวะไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือดจำนวน 121 ราย โดยใช้การตรวจด้วยเครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบของร่างกายชนิดความถี่เดียง (single-frequency bioelectrical impedance) และติดขั้ววัดไฟฟ้าชนิดวัดทั้งร่างกาย (wrist-ankle) ทำการวัดค่า bioelectrical impedance เมื่อเสร็จการฟอกเลือดนาน 30 นาที โดยนำค่าที่ได้มาคำนวณหาสารน้ำในร่างกาย และเปรียบเทียบกับปริมาณสารน้ำในร่างกายของประชากรชาวไต้หวันที่ไม่มีความผิดปกติจำนวน 74 ราย ได้จากการใช้เครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบของร่างกายชนิดเดียวกัน โดยกำหนดน้ำหนักแห้งของผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือดเมื่อปริมาณสารน้ำนอกเซลล์ของผู้ป่วยมีปริมาณใกล้เคียงกับกลุ่มประชากรปกติ พบว่าผู้ป่วยที่มีร้อยละของสารน้ำนอกเซลล์ (%ECW) สูงจะมีความดันโลหิตสูง และเมื่อลดน้ำหนักแห้งของผู้ป่วยกลุ่มนี้จะมีร้อยละสารน้ำนอกเซลล์ลดลง ทำให้ความดันโลหิตลดลงได้ ผู้ป่วยที่ไม่มีภาวะความดันโลหิตสูงจะมีระดับร้อยละสารน้ำนอกเซลล์(%ECW) ปกติ แต่ยังคงมีผู้ป่วยบางรายที่มีภาวะความดันโลหิตสูงแต่มีระดับร้อยละของสารน้ำเป็นปกติและไม่สามารถลดน้ำหนักแห้งลงได้อีก ในผู้ป่วยที่มีภาวะความดันโลหิตต่ำระหว่างการฟอกเลือดจะมีระดับร้อยละของสารน้ำนอกเซลล์ปกติเมื่อเพิ่มน้ำหนักแห้งจะทำให้อาการและความดันโลหิตระหว่างฟอกเลือดดีขึ้นได้

เนื่องจากการตรวจหาน้ำหนักแห้งวิธีนี้ ยังคงต้องมีค่าของประชากรปกติและอาศัยการคำนวณค่าสารน้ำในร่างกายจากสมการซึ่งได้จากประชากรที่แตกต่างกัน ดังนั้นการนำค่าที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบของร่างกายมาคำนวณเพื่อวิเคราะห์น้ำหนักแห้งในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือดจะต้องใช้ร่วมกับอาการและอาการแสดงของผู้ป่วยระหว่างและหลังฟอกเลือดเสมอ สำหรับประเทศไทยยังไม่มีข้อมูลของประชากรปกติทำให้การใช้การวิเคราะห์น้ำหนักแห้งจากวิธีนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนได้

ข. การใช้อัตราส่วนของน้ำในเซลล์ และน้ำนอกเซลล์ (ICW/ECW)[74]

ในภาวะปกติร่างกายจะควบคุมอัตราส่วนการใช้อัตราส่วนของน้ำในเซลล์ และน้ำนอกเซลล์ (ICW/ECW) ให้อยู่ในเกณฑ์คงที่ แต่ในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังจะมีปริมาณน้ำในร่างกายเกินและมักจะอยู่ในส่วนของน้ำนอกเซลล์ ทำให้อัตราส่วนของ ICW/ECW มีแนวโน้มลดลง การใช้เครื่อง bioelectrical impedance สามารถคำนวณปริมาณสารน้ำทั้ง 2 ส่วนได้ทำให้สามารถทราบอัตราส่วน ICW/ECW เพื่อใช้ในการประเมินน้ำหนักแห้งได้ แต่การใช้อัตราส่วนนี้ยังคงต้องอาศัยสมการและทฤษฎี mixing ซึ่งจะมีความแตกต่างในแต่ละกลุ่มประชากร

พบว่าค่าความต้านทานจะสัมพันธ์กับปริมาณน้ำในแต่ละส่วน ดังนั้นค่าความต้านทานของน้ำนอกเซลล์จะสัมพันธ์กับปริมาณน้ำนอกเซลล์(Re) ขณะที่ค่าความต้านทานของน้ำในเซลล์ (Ri) จะสัมพันธ์กับปริมาณน้ำในเซลล์ เมื่อนำค่า Ri / Reจะสัมพันธ์กับอัตราส่วนของน้ำในเซลล์ และน้ำนอกเซลล์ โดยไม่ต้องใช้ทฤษฎี mixing และสมการในการคำนวณเพื่อหาปริมาณน้ำทั้ง 2 ส่วนจากเครื่อง bioelectrical impedance เพื่อหลีกเลี่ยงข้อจำกัดของสมการอย่าที่กล่าวมา

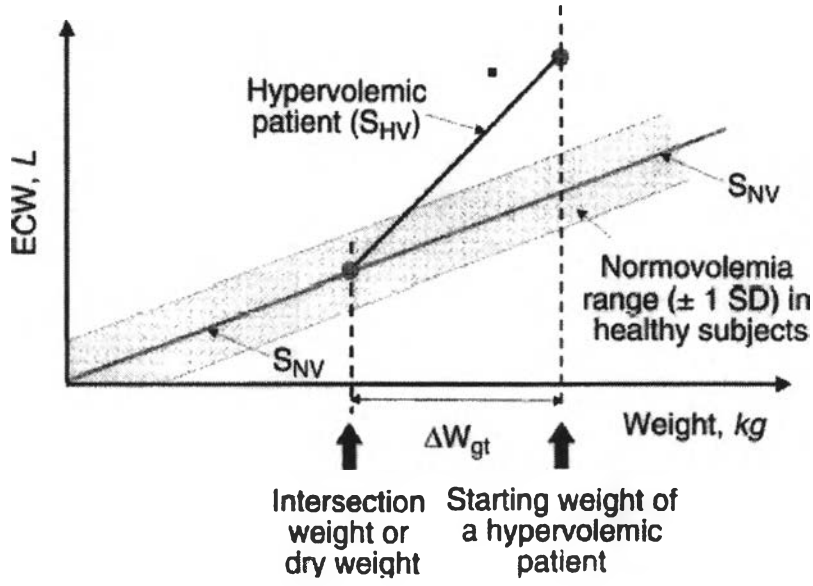
อาจนำค่า Ri / Re ใช้ในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือดเพื่อช่วยประเมินน้ำหนักแห้ง โดยจะมีค่าใกล้เคียงกลุ่มปกติเมื่อถึงน้ำหนักแห้ง โดยต้องมีการสำรวจประชากรกลุ่มปกติเพื่อได้ค่า Ri / Re ที่ปกติ โดยจากข้อมูลของ Spiegel ไม่พบความแตกต่าง ของค่า Ri / Re ในประชากรที่มีความแตกต่างกันในแง่ ความสูง อายุ น้ำหนัก และ ดัชนีมวลกาย (BMI) แต่มีความแตกต่างกันในเพศ โดยเพศหญิง จะมีค่า Ri / Re สูงกว่าในเพศชาย เมื่อนำค่า Ri / Re ของผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือด มาเปรียบเทียบกับประชากรปกติพบว่า ส่วนมากจะมีค่า Ri / Re ต่ำลงและเมื่อฟอกเลือดเสร็จจะมีค่าสูงขึ้นจนใกล้เคียงประชากรปกติ แต่ทั้งนี้ยังคงมีผู้ป่วยบางรายที่มีภาวะน้ำในร่างกายเกิน แต่ค่า Ri / Re อยู่ในเกณฑ์ปกติแสดงถึงความไวของวิธีนี้ยังไม่ดีเพียงพอ จึงทำให้ค่านี้เพียงค่าเดียวไม่สามารถบอกถึงภาวะน้ำในร่างกายเกินเมื่อ ค่า Ri / Re ปกติ แต่หากค่านี้ต่ำกว่าปกติการขจัดน้ำเพิ่มขึ้นจะสามารถช่วยบอกถึงน้ำหนักแห้งผู้ป่วยได้

2.10.2 **การใช้ vector ของค่า bioimpedance(Z) ในการหาน้ำหนักแห้งของผู้ป่วยฟอกเลือด**[12]

ระดับแกน vector จากค่าความต้านทาน(resistant; R) และค่าการเก็บประจุ (reactant; Xc) ในผู้ป่วยที่มีปริมาณน้ำในร่างกายเกิน จะมีขนาดและทิศทางที่ต่ำและสั้นลงเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มคนปกติ(11) เมื่อนำ vector มาใช้ในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือดจะสามารถช่วยประเมินปริมาณสารน้ำในร่างกาย และช่วยในการประเมินน้ำหนักแห้ง โดยผู้ป่วยจะมีลักษณะของ vector ระหว่างร้อยละ 50-75 ของกลุ่มประชากรปกติ ดังแสดงในรูปที่11 พบว่าทั้ง 2 วิธีต้องอาศัยข้อมูลของกลุ่มคนปกติซึ่งยังมีความแตกต่างกันในหลายปัจจัย เช่น เพศ อายุ เชื้อชาติ โรคประจำตัว ภาวะทางโภชนาการ จึงเป็นการยากที่จะสามารถหาค่าควบคุมในกลุ่มประชากรใดกลุ่มหนึ่ง

2.10.3 **การใช้ค่าความชันของการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำนอกเซลล์**[75]

เป็นการใช้เครื่อง bioelectrical impedance ในการตรวจปริมาณ ECW และประเมินน้ำหนักแห้ง โดยจะถึงน้ำหนักแห้งเมื่อความชันของกราฟเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่าง ECW และน้ำหนักของผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือด (SHV) ตัดกับกราฟของประชากรกลุ่มปกติ (SNV) ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ECW และน้ำหนักในประชากรปกติ และ กราฟของการเปลี่ยนแปลง ECW ขณะฟอกเลือดของผู้ป่วยไตวายเรื้อรัง SV_{NV} คือความชันของกราฟความสัมพันธ์ของ และน้ำหนักของประชากรปกติ S_{HV} คือความชันของกราฟการเปลี่ยนแปลง ECW ขณะฟอกเลือดของผู้ป่วยไตวายเรื้อรัง ΔWgt คือน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของผู้ป่วยไตวายเรื้อรังหลังฟอกเลือด

สามารถหากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ECW และน้ำหนักในประชากรปกติได้จากการสำรวจในประชากรปกติ ในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือดมีการขจัดน้ำส่วนเกินของร่างกายจะมีน้ำหนักลดลง 1 กิโลกรัม เมื่อขจัดน้ำไป1 ลิตร และน้ำที่ขจัดออกเป็นน้ำในส่วนของ ECW มากที่สุด จะถึงน้ำหนักแห้งเมื่อระดับ ECW ลงมาอยู่ในเกณฑ์ปกติเมื่อเทียบกับประชากร ดังรูปที่ 2 กราฟที่ได้จากการลากเส้นตรงระหว่าง ECW ก่อนฟอกเลือดจนถึง ECW เมื่อฟอกเลือดเสร็จสามารถนำมาคำนวณน้ำหนักแห้งได้

สามารถหาค่าความชันกราฟของผู้ป่วยฟอกเลือด (SHV) ได้จาก

$$SHV = ECWm- ECWNV / Wgtm – Wgtdry \qquad \text{สมการที่ 14}$$

สามารถหาค่า ECWNV ได้จากความชันของความสัมพันธ์ของ ECW และน้ำหนัก โดย

$$ECWNV = (SVNV)(Wgtdry) \qquad \text{สมการที่ 15}$$

เมื่อแทนค่า ECWNV จากสมการที่ 6 ลงในสมการที่ 5 จะได้ค่า Wgtdry ดังนี้

$$Wgtdry = (SHV)(Wgtm) - ECWm / SHV- SNV \qquad \text{สมการที่ 16}$$

สามารถหาค่า SHV ได้จาก

$$SHV = \Delta ECW / \Delta Wgt \qquad \text{สมการที่ 17}$$

เนื่องจากการขจัดน้ำ 1 ลิตร จากการฟอกเลือดน้ำหนักตัวของผู้ป่วยจะลดลง 1 กิโลกรัม เมื่อแทนค่าของน้ำหนักก่อนฟอกเลือดและปริมาณน้ำที่ขจัดออก ทำให้ค่า SHV จะมีค่าเท่ากับใกล้เคียง 1

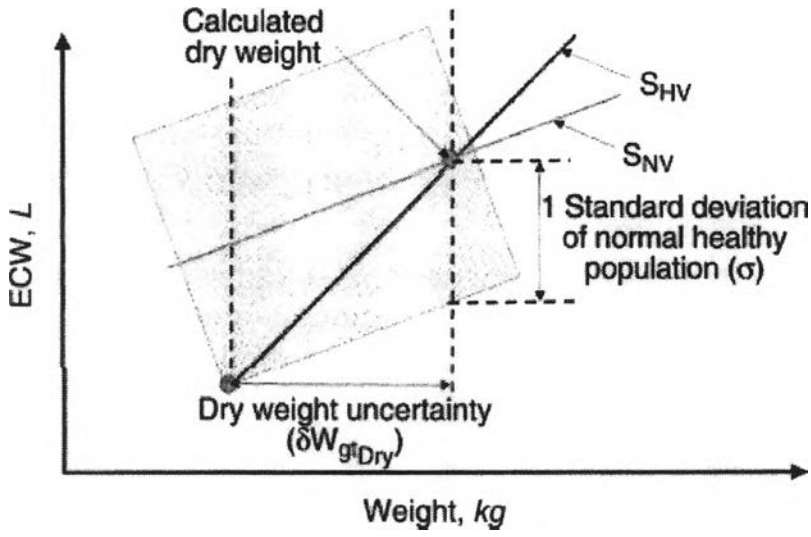
สามารถหาค่า SVNV ได้จากการสำรวจในประชากรปกติและนำมาสร้างกราฟ โดยจากข้อมูลการศึกษาของของประชากรปกติชาวสหราชอาณาจักรจำนวน 70 ราย จะมีค่า 0.214 ลิตร/กิโลกรัม75

ค่า ECWm เป็นปริมาณน้ำนอกเซลล์ของผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่มีน้ำหนักเท่ากับ Wgtm ก่อนได้รับการฟอกเลือด ซึ่งสามารถหาได้จากการใช้เครื่อง bioelectrical impedance และใช้สมการในการคำนวณ

ค่า Wgtmน้ำหนักตัวของผู้ป่วยไตวายเรื้อรังก่อนได้รับการฟอกเลือด

เมื่อแทนค่าทั้งหมดในสมการที่ 7 ทำให้สามารถคำนวณน้ำหนักแห้งในผู้ป่วยได้ มีการนำวิธีนี้มาใช้เพื่อประมาณน้ำหนักแห้งในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือดครั้งแรก Chamney และคณะ[75] ได้ปรับน้ำหนักแห้งในผู้ป่วยชาวสหราชอาณาจักรที่มีภาวะไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือดจำนวน 13 ราย โดยลดน้ำหนักครั้งละ 0.5-2 กิโลกรัมต่อครั้ง สามารถทำให้ผู้ป่วยถึงน้ำหนักแห้งได้โดยใช้เวลา 2-6 สัปดาห์ และสามารถคุมความดันโลหิตได้โดยลดปริมาณการใช้ยาได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ วิธีนี้เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เครื่อง bioelectrical impedance ในการหาน้ำหนักแห้งในวิธีแรก พบว่าสามารถลดน้ำหนักลงได้อีก แต่วิธีนี้ยังคงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมอีก

วิธีนี้ยังคงต้องใช้ข้อมูลของกลุ่มประชากรปกติ โดยอาศัยทฤษฎี mixing และการใช้สมการในการคำนวณปริมาณ ECW เพื่อใช้ในการสร้างกราฟ และการสร้ากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ECW และน้ำหนัก ทำให้ยังมีผลของความแตกต่างของกลุ่มประชากรที่มาศึกษาและประชากรผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือด โดยเฉพาะในผู้ป่วยที่มีภาวะทุโภชนา หรือภาวะอ้วน นอกจากนี้ค่า ECW ยังมีความเบี่ยงเบน ทำให้เมื่อนำค่าที่คำนวณได้มาใช้ ผลของน้ำหนักแห้งจะมีความเบี่ยงบนได้เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 18 ดังนั้นการใช้วิธีนี้ควรอาศัยข้อมูลทางอาการและอาการแสดงร่วมด้วยเสมอ



รูปที่ 18 แสดงความแตกต่างของการใช้ค่า ECW ของประชากรปกติที่มีความเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ย ทำให้การประเมินน้ำหนักแห้งในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังมีโอกาสผิดพลาดได้

2.10.4 **การใช้อัตราส่วนค่าความต้านทานก่อนฟอกเลือดและระหว่างฟอกเลือด**[76]

ผู้ป่วยไตวายเรื้อรังขณะที่ทำการฟอกเลือดจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในร่างกาย โดยเฉพาะส่วนที่อยู่นอกเซลล์ จนเมื่อถึงน้ำหนักแห้งระดับน้ำนอกเซลล์จะมีระดับคงที่จนไม่สามารถขจัดได้เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากน้ำในส่วน Interstitial จะมีลักษณะเป็นเจล โดยภาพรวมความเปลี่ยนแปลงของ ECW จะมีค่าคงที่เมื่อถึงน้ำหนักแห้ง ดังนั้นเมื่อนำค่า ECW ณ เวลาที่ขจัดน้ำเทียบกับเวลาก่อนขจัดน้ำ (ECWt /ECW0) จะมีค่าคงที่เมื่อถึงน้ำหนักแห้ง
สามารถหาค่า ECWt /ECW0 ได้จากแทนค่า V จากสมการที่ 4

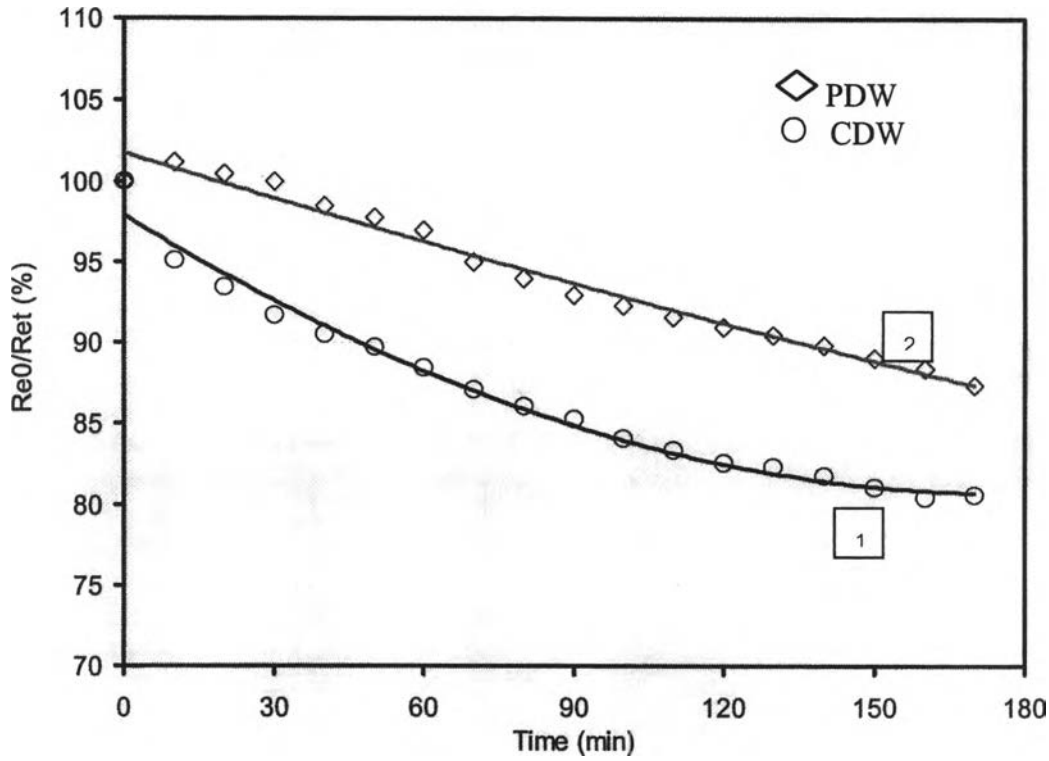
$$ECWt / ECW0 = (\rho L^2 / Rt) / (\rho L^2 / R0)$$

$$ECWt / ECW0 = R0 / Rt \qquad \text{สมการที่ 18}$$

โดยที่ค่า

- ECWt คือ ปริมาณน้ำนอกเซลล์เมื่อเวลาฟอกเลือด (ลิตร)
- ECW0 คือ ปริมาณน้ำนอกเซลล์เมื่อเวลาที่เริ่มฟอกเลือด
- ρ = ค่าความต้านทานต่อหนึ่งหน่วย (ohm-cm)
- L= ความยาว (cm)
- Rt คือค่าความต้านทานเมื่อเวลาฟอกเลือด (ohm)
- R0 คือค่าความต้านทานเมื่อเวลาเริ่มฟอกเลือด (ohm)

สามารถนำค่า R0 / Rt มาใช้ในการประเมินน้ำหนักแห้ง โดย F. ZHU และคณะ[76]ได้นำเครื่อง bioelectrical impedance มาใช้เพื่อประเมินน้ำหนักแห้งในผู้ป่วยตลอดเวลาของการฟอกเลือด โดยความแตกต่างของ R0/Rt น้อยกว่า 1% ซึ่งค่านี้จะแสดงถึงระดับการเปลี่ยนแปลงของระดับ ECV ซึ่งจะน้อยมากและจะสัมพันธ์กับน้ำหนักแห้งของผู้ป่วย ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า R_0 / R_t ระหว่างการการฟอกเลือด โดยเมื่อถึงน้ำหนักแห้ง (กราฟเส้นที่ 1) จะมีลักษณะความชันไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อถึงน้ำหนักแห้ง ขณะที่ กราฟเส้นที่ 2 ยังคงมีความชันของกราฟมากอยู่

- PDW =การเปลี่ยนแปลงของค่า R_0 / R_t ระหว่างการการฟอกเลือดของผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือด ซึ่งยังไม่ถึงน้ำหนักแห้งเมื่อฟอกเลือดเสร็จ
- CDW =การเปลี่ยนแปลงของค่า R_0 / R_t ระหว่างการการฟอกเลือดของผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือดที่ได้ภาวะน้ำหนักแห้งเมื่อฟอกเลือดเสร็จ

พบว่าการหาน้ำหนักแห้งวิธีนี้ สามารถนำมาใช้ได้และสามารถลดระดับความดันโลหิตและขนาดของยาลดความดันโลหิตได้ และน้ำหนักแห้งที่ได้จากวิธีนี้ยังสามารถป้องกันภาวะขาดน้ำจากการขจัดน้ำมากเกิน ซึ่งก่อให้เกิดผลเสียต่อผู้ป่วยเช่นเดียวกัน การหาน้ำหนักแห้งวิธีนี้เป็นการใช้ค่าที่ได้จากการวัดของเครื่อง bioelectrical impedance โดยตรง โดยไม่ต้องใช้ค่าจากสมการหรือ ทฤษฎี mixing ทำให้ไม่มีผลของความแตกต่างของประชากรที่ใช้วัดและประชากรกลุ่มปกติ

2.11 บทสรุป

การประเมินน้ำหนักแห้งในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือดมีความสำคัญอย่างยิ่ง หากประเมินน้ำหนักแห้งมากเกินหรือน้อยเกินไปจะก่อให้เกิด ความผิดปกติได้และอาจจะก่อให้เกิดอันตรายได้โดยเฉพาะ ผลต่อระบบหัวใจและหลอดเลือด ในประเทศไทยการประเมินน้ำหนักแห้งในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่ได้รับการฟอกเลือดอาศัยอาการทางคลินิกเป็นสำคัญ ทำให้มีผู้ป่วยจำนวนหนึ่งที่จะมีภาวะน้ำในร่างกายเกินหรือถูกขจัดน้ำมากเกินไป มีความพยายามนำเทคโลโนยีใหม่ๆ มาใช้เพื่อประเมินน้ำหนักแห้ง โดยเฉพาะเครื่อง bioelectrical impedance แต่ข้อมูลในประเทศไทยยังไม่มีข้อมูลของค่าปกติของค่า bioelectrical impedance ทำให้เมื่อนำค่าที่ได้จากเครื่องมาประเมินน้ำหนักแห้งอาจไม่แม่นยำเพียงพอ วิธีการหาน้ำหนักแห้งโดยใช้อัตราส่วนค่าความต้านทานระหว่างฟอกเลือดอาจเป็นวิธีที่ได้ผลเป็นอย่างดี เพราะไม่ต้องอาศัยข้อมูลอื่นในประชากรปกติ จึงเป็นวิธีที่การศึกษานี้นำมาใช้เพื่อประเมินน้ำหนักแห้งในผู้ป่วยฟอกเลือดในประเทศไทย