ขอบเขตความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความจุกับอัตราส่วนความนำในแบตเตอรี่ VRLA

บริษัท พีอีซี เทคโนโลยี(ประเทศไทย) จำกัด

เอกสารฉบับนี้เรียบเรียงจากความเข้าใจของผู้เขียนเอง ดังนั้นโปรดใช้วิจารณญาณในการไตร่ตรองเนื้อหาและความสมเหตุสมผลของเอกสารนี้

บทคัดย่อ

เอกสารนี้ได้แสดงแนวคิดในการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าความนำและอัตราส่วนความจุแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด แบบ VRLA โดยอาศัยลักษณะทางกายภาพของ Active material คือ ปริมาณและความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลท์ รวมถึงปริมาณแผ่นธาตุในแบตเตอรี่ โดยได้พิจารณาสาเหตุที่ทำให้ปริมาณของ Active material เปลี่ยนแปลงคือการแห้งลงของอิเล็กโตรไลท์ (Dry out) การ Undercharge และการเกิด Hard sulfate ซึ่งผลที่ได้แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของ Active material เมื่อพิจารณาถึงขีดจำกัดทางกายภาพต่างๆแล้ว จะสามารถกำหนดขอบเขตของความสัมพันธ์ของอัตราส่วนค่าความนำกับอัตราส่วนความจุได้ ถึงแม้ว่าเป็นการยากที่จะระบุถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำกับความจุของแบตเตอรี่ แต่ก็ได้แสดงให้เห็นว่าที่ค่าความนำต่ำกว่า 60 % ความจุแบตเตอรี่จะต่ำกว่า 100%

1) สมมติฐานทั่วไป

1.1) แบตเตอรี่อยู่ในสถานะถูกประจุเต็ม และปริมาณตะกั่วซัลเฟตที่แผ่นธาตุไม่สามารถเปลี่ยนคืนเป็น Active material ได้อีกแล้ว (Hard sulfate)

1.2) ค่าความนำแบตเตอรี่ได้พิจารณาเฉพาะส่วนของอิเล็กโตรไลท์เท่านั้น ค่าความต้านทานของโลหะ เช่น แผ่นธาตุ , สแตรป ,จุดเชื่อมต่อและขั้ว ถือว่ามีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับความต้านทานของอิเล็กโตรไลท์ และไม่ได้นำมาพิจารณา สมมุติฐานนี้สามารถใช้ได้กับแบตเตอรี่ที่มีโครงสร้างเป็นแบบ Flat Plate ทั่วไป แต่อาจจะให้ผลลัพธ์ที่คลาดเคลื่อนกับแบตเตอรี่ VRLA บางประเภท เช่นแบบ Tubular หรือแบบ Front access ที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งมีโครงสร้างของแผ่นธาตุและสแตรปที่ยาวส่งผลให้ค่าความต้านทานในส่วนของโลหะ ไม่สามารถละเลยได้

1.3) เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ จึงละเลยการเกิดขึ้นของน้ำในบางปฏิกิริยา

1.4) ความจุของแบตเตอรี่ในเอกสารนี้พิจารณาเฉพาะความสัมพันธ์ของ Active Material ที่สมมูลกับปริมาณประจุไฟฟ้า โดยมิได้นำปัจจัยทางไฟฟ้า,จลศาสตร์ และอุณหพลศาสตร์มาพิจารณา

1.5) ค่าต่างๆที่เป็นค่าเฉพาะของแบตเตอรี่ที่ใช้คำนวณในเอกสารนี้เช่น น้ำหนักของอิเล็กโตรไลท์ น้ำหนักแผ่นธาตุ จะอ้างอิงตามภาคผนวก ข ซึ่งเป็นการออกแบบขั้นพื้นฐานสำหรับแบตเตอรี่แบบ AGM ที่มีความหนาแน่นของอิเล็กโตรไลต์ 1.300

ก) แบบ Flat plate ข) แบบ Tubular ค) แบบ Front access

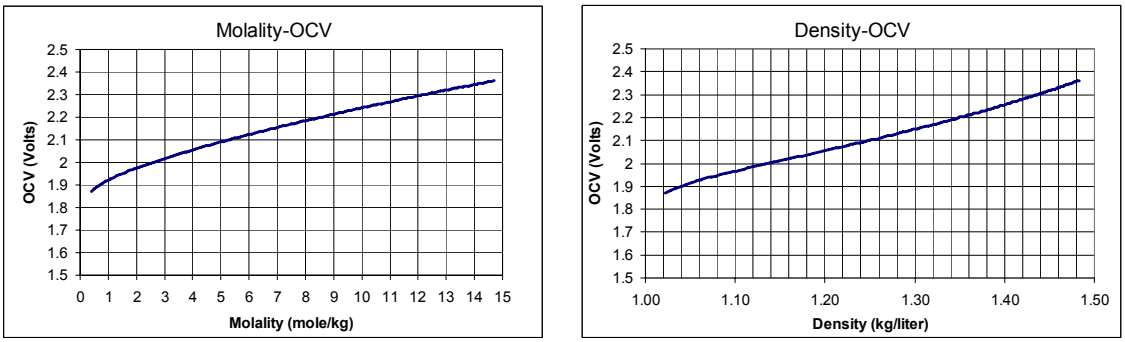
รูปที่ 1 แบตเตอรี่ VRLA แบบต่าง ๆ

2) ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารละลาย H_2SO_4 กับแรงดัน OCV

แรงดัน OCV ของแบตเตอรี่จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย H_2SO_4 (ดูภาคผนวก ก)

แรงดัน OCV สัมพันธ์กับความเข้มข้นเป็นโมแลลลิตีดังนี้

$$OCV = 1.9228+0.147519\times\log(m)+0.063552\times\log(m)^2+0.073772\times\log(m)^3+0.033612\times\log(m)^4 \quad (V)$$

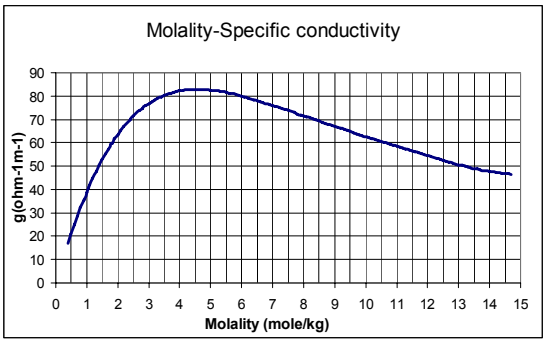


ก) โมแลลลิตีกับ OCV ข) ความหนาแน่นกับ OCV

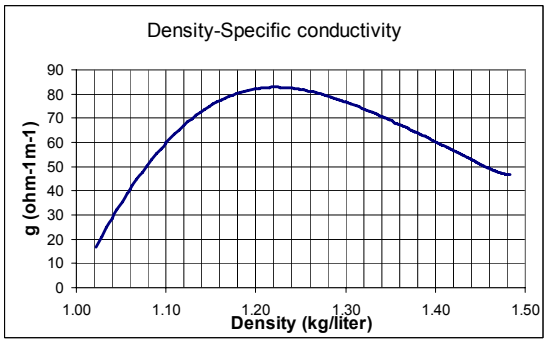
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารละลาย H_2SO_4 กับแรงดัน OCV ที่ 25°C

3) ค่าความนำของอิเล็กโตรไลท์

3.1) ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารละลาย H_2SO_4 จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย โดยมีความนำสูงสุดที่ความเข้มข้นประมาณ 4.6 mol/kg หรือที่ความหนาแน่น 1.2234 (ดูภาคผนวก ก)



ก) โมแลลลิตีกับค่าความนำจำเพาะ



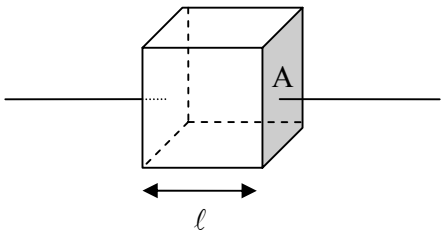
ข) ความหนาแน่นกับค่าความนำจำเพาะ

รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารละลาย H_2SO_4 กับค่าความนำจำเพาะ g($\Omega^{-1}m^{-1}$) ที่ 25°C

ตารางที่ 1 ความเข้มข้น, ความหนาแน่น, ค่าความนำจำเพาะ และแรงดัน OCV ที่สำคัญ

Molality (mol/kg)	Density (kg/liter) @ 25°C	Conductivity ($\Omega^{-1}m^{-1}$)	OCV (Volts)
1.06	1.06	40.71	1.926
1.815	1.10	59.90	1.967
4.6	1.2234	82.82	2.076
5.6	1.26	81.23	2.110
6.81	1.30	76.81	2.194
10.3	1.3943	61.37	2.249

3.2) ความสัมพันธ์ของค่าความนำกับความเข้มข้นและปริมาณของสารละลาย H_2SO_4



รูปที่ 4 แบบจำลองสสารที่ใช้หาความต้านทาน

พิจารณาสสารที่มีความต้านทานจำเพาะ $\rho(\Omega \cdot m)$ มีความยาว ℓ และพื้นที่หน้าตัด A ดังแสดงใน รูปที่ 4 จะมีความต้านทาน

$$R = \frac{\rho \ell}{A}(\Omega) \qquad (1)$$

เมื่อให้ค่าความนำจำเพาะ $g = \frac{1}{\rho}(\Omega^{-1}m^{-1})$ และค่าความนำ $G = \frac{1}{R}$

สสารจะมีความนำ

$$G = \frac{gA}{\ell}(S) \qquad (2)$$

ค่าความนำสามารถจัดให้อยู่ในรูปของปริมาตร (V) ได้โดยคูณ ℓ ทั้งเศษและส่วนของสมการ (2)

$$G = \frac{gA}{\ell} x \frac{\ell}{\ell} = \frac{gA\ell}{\ell^2} = \frac{gV}{\ell^2}(S) \qquad (3)$$

โดยที่ V คือปริมาตรของสสารมีความสัมพันธ์ $V = A\ell(m^3)$

พิจารณาอิเล็กโตรไลท์ของแบตเตอรี่

3.2.1) กรณีแบตเตอรี่ใหม่

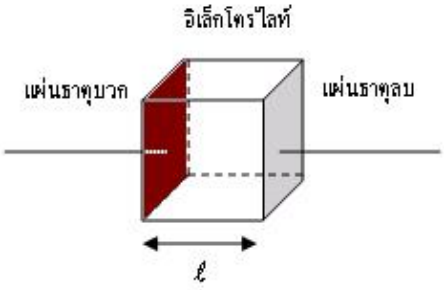
กำหนดให้ g_i คือค่าความนำจำเพาะของสารละลาย H_2SO_4 ในแบตเตอรี่ใหม่

V_i คือปริมาตรของสารละลาย H_2SO_4 ในแบตเตอรี่ใหม่

ℓ_i คือความยาวประสิทธิผลของอิเล็กโตรไลท์ ในแบตเตอรี่ใหม่

B_i คือน้ำหนักของอิเล็กโตรไลท์ ในแบตเตอรี่ใหม่

D_i คือความหนาแน่นของอิเล็กโตรไลท์ ในแบตเตอรี่ใหม่



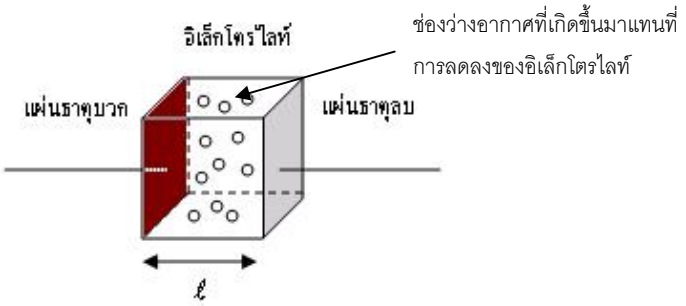
รูปที่ 5 รูปจำลองแผ่นธาตุและอิเล็กโตรไลท์ในแบตเตอรี่ใหม่

จากสมการ (3) จะได้ค่าความนำของแบตเตอรี่ใหม่ G_n

$$G_n = \frac{g_n V_n}{\ell_n^2} \qquad (4)$$

3.2.2) กรณีแบตเตอรี่เสื่อม (อิเล็กโตรไลท์แห้งลงหรือมีการเปลี่ยนแปลง)

เมื่ออิเล็กโตรไลท์แห้งลงหรือมีการเปลี่ยนแปลง ได้พิจารณาให้ปริมาตรของอิเล็กโตรไลท์ลดลงแต่พื้นที่ผิวระหว่างอิเล็กโตรไลท์กับแผ่นธาตุไม่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 รูปจำลองแผ่นธาตุและอิเล็กโตรไลท์ในกรณีที่อิเล็กโตรไลท์แห้งลง

กำหนดให้ g_d คือค่าความนำจำเพาะของสารละลาย H_2SO_4 ในกรณีอิเล็กโตรไลท์แห้งลง

V_d คือปริมาตรของสารละลาย H_2SO_4 ที่เหลืออยู่

ℓ_d คือความยาวประสิทธิผลของอิเล็กโตรไลท์

B_d คือน้ำหนักของอิเล็กโตรไลท์ที่เหลืออยู่

D_d คือความหนาแน่นของอิเล็กโตรไลท์

จากสมการ (3) จะได้ค่าความนำของแบตเตอรี่ที่อิเล็กโตรไลท์แห้งลง G_d

$$G_d = \frac{g_d V_d}{\ell_d^2} \tag{5}$$

3.2.3) อัตราส่วนของความนำ

อัตราส่วนของความนำของแบตเตอรี่เสื่อมเทียบกับแบตเตอรี่ใหม่ จากสมการ (4) และ (5) จะได้

$\frac{(5)}{(4)}$

$$\frac{G_d}{G_n} = \frac{g_d V_d}{\ell_d^2} \frac{\ell_n^2}{g_i V_n}$$

$$\frac{G_d}{G_n} = \left(\frac{g_d}{g_n}\right)\left(\frac{V_d}{V_n}\right)\left(\frac{\ell_i^2}{\ell_d^2}\right) \tag{6}$$

สมมุติให้ความยาวประสิทธิผลของอิเล็กโตรไลท์ $\ell_n = \ell_d$ จะได้

$$\frac{G_d}{G_n} = \left(\frac{g_d}{g_n}\right)\left(\frac{V_d}{V_n}\right) \tag{7}$$

สมการที่ (7) แสดงถึงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความนำของแบตเตอรี่ในฟังก์ชันของอัตราส่วนค่าความนำจำเพาะ $\frac{g_d}{g_n}$ ซึ่งเปลี่ยนไปตามความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลท์ และอัตราส่วนของปริมาตรอิเล็กโตรไลท์

จากความสัมพันธ์

$$\text{ความหนาแน่น D} = \frac{B}{V} \tag{8}$$

โดยที่ D = ความหนาแน่น (kg/liter)

B = น้ำหนัก (kg)

V = ปริมาตร (liter)

จะได้ $V_n = \frac{B_n}{D_n}$ และ $V_d = \frac{B_d}{D_d}$ แทนค่าลงในสมการที่ 7

$$\frac{G_d}{G_n} = \left(\frac{g_d}{g_n}\right)\left(\frac{B_d}{D_d}\right)\left(\frac{D_n}{B_n}\right)$$

$$\frac{G_d}{G_n} = \left(\frac{g_d}{g_n}\right)\left(\frac{D_n}{D_d}\right)\left[\frac{B_d}{B_n}\right] \tag{9}$$

สมการที่ (9) แสดงถึงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความนำกับอัตราส่วนน้ำหนักของอิเล็กโตรไลท์ที่มีอยู่ในแบตเตอรี่

3.2.4) ข้อจำกัดของน้ำหนักของอิเล็กโตรไลท์; $B_{d,b}$

ในหัวข้อนี้จะแสดงขอบเขตของน้ำหนักของอิเล็กโตรไลท์ซึ่งทำให้สมการที่ (9) เป็นจริง(Existing) ภายใต้ข้อจำกัดของปริมาณ H_2SO_4 และน้ำในแบตเตอรี่ใหม่

เมื่อแบตเตอรี่ใหม่มีน้ำหนักของอิเล็กโตรไลท์ B_n มีความเข้มข้นเป็นโมแลลลิตีเท่ากับ m_n จะมีน้ำหนักของ H_2SO_4 เท่ากับ

$$B_{A,n} = \frac{B_n m_n w_{1,kg}}{m_n w_{1,kg} + 1}(kg) \tag{10}$$

และมีน้ำหนักของน้ำเท่ากับ

$$B_{H,n} = \frac{B_n}{m_n w_{1,kg} + 1}(kg) \tag{11}$$

โดยที่ $w_{1,kg}$ คือน้ำหนักของ H_2SO_4 จำนวน 1 โมล = 0.09807948 kg

เมื่อแบตเตอรี่เสื่อมลงมีน้ำหนักของอิเล็กโตรไลท์ B_d และมีความเข้มข้นเป็นโมแลลลิตีเท่ากับ m_d จะมีน้ำหนักของ H_2SO_4 เท่ากับ

$$B_{A,d} = \frac{B_d m_d w_{1,kg}}{m_d w_{1,kg} + 1}(kg) \tag{12}$$

และมีน้ำหนักของน้ำเท่ากับ

$$B_{H,d} = \frac{B_d}{m_d w_{1,kg} + 1}(kg) \tag{13}$$

เมื่อแบตเตอรี่เสื่อมลงปริมาณของ H_2SO_4 และน้ำจะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ เมื่อแบตเตอรี่ใหม่ เพราะฉะนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์ของน้ำหนักอิเล็กโตรไลท์ B_d ได้ดังนี้

เงื่อนไขที่ 1 : น้ำหนักของ H_2SO_4 ในแบตเตอรี่เสื่อมจะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับน้ำหนักของ H_2SO_4 ในแบตเตอรี่ใหม่

: ให้น้ำหนักของอิเล็กโตรไลท์ในเงื่อนไขนี้คือ B_{d1}

จากสมการ (10) และ (12) $B_{A,d} \le B_{A,n}$

$$\frac{B_{d1} m_d w_{1,kg}}{m_d w_{1,kg} + 1} \le \frac{B_n m_n w_{1,kg}}{m_n w_{1,kg} + 1}$$

$$B_{d1} \le \frac{B_n m_n}{m_n w_{1,kg} + 1} \frac{m_d w_{1,kg} + 1}{m_d} \tag{14}$$

เงื่อนไขที่2 : น้ำหนักของน้ำในแบตเตอรี่เสื่อมจะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับน้ำหนักของน้ำในแบตเตอรี่ใหม่

: ให้น้ำหนักของอิเล็กโตรไลท์ในเงื่อนไขนี้คือ B_{d2}

จากสมการ (11) และ (13) $B_{H,d} \le B_{H,n}$

$$\frac{B_{d2}}{m_d w_{1,kg} + 1} \le \frac{B_n}{m_n w_{1,kg} + 1}$$

$$B_{d2} \le B_n \left(\frac{m_d w_{1,kg} + 1}{m_n w_{1,kg} + 1} \right) \tag{15}$$

จากทั้งสองเงื่อนไขนี้ สามารถจำแนกขอบเขตของอิเล็กโตรไลท์ได้เป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 : ค่า $m_d \geq m_n$

ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลท์ในแบตเตอรี่เสื่อมสูงกว่าความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลท์ในแบตเตอรี่ใหม่ (ซึ่งอาจสัมพันธ์กับการเสื่อมแบบ Dry-out) ในกรณีนี้จะพบว่า $B_{d1} < B_{d2}$ ดังนั้นขีดจำกัดของอิเล็กโตรไลท์จึงเป็นไปตามเงื่อนไขที่ 1 ดังนั้นจากสมการ (14) จะได้

$$B_{d,b} = B_{d1} \leq \frac{B_n m_n}{m_n w_{1,kg} + 1} \frac{m_d w_{1,kg} + 1}{m_d} \tag{16}$$

สำหรับค่าสูงสุดของความเข้มข้น m_d จะกล่าวถึงโดยละเอียดในหัวข้อที่ 5

กรณีที่2 : ค่า $m_d < m_n$

ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลท์ในแบตเตอรี่เสื่อมมีค่าน้อยกว่าความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลท์ในแบตเตอรี่ใหม่(ซึ่งอาจสัมพันธ์กับการเกิด Undercharge และการเกิด Hard sulfate) ในกรณีนี้จะพบว่า $B_{d1} > B_{d2}$ ดังนั้นขีดจำกัดของอิเล็กโตรไลท์จึงเป็นไปตามเงื่อนไขที่ 2 ดังนั้นจากสมการที่ (15) จะได้

$$B_{d,b} = B_{d2} \leq B_n \left(\frac{m_d w_{1,kg} + 1}{m_n w_{1,kg} + 1} \right) \tag{17}$$

4) ความสัมพันธ์ของอิเล็กโตรไลท์กับความจุและความนำของแบตเตอรี่

4.1) ความสัมพันธ์ของอิเล็กโตรไลท์กับความจุไฟฟ้าสมมูล

ทั้งปริมาณ(น้ำหนัก,ปริมาตร) และความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลท์สัมพันธ์กับความจุไฟฟ้าสมมูลจากภาคผนวก ข จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$B_i = \frac{Ah}{26.802} \frac{\left(1 + m_i w_{1,kg}\right)\left(1 + m_f w_{2,kg}\right)}{m_i - m_f}$$

หรือจัดรูปใหม่จะได้

$$Ah = 26.802 x B_i \frac{m_i - m_f}{\left(1 + m_i w_{1,kg}\right)\left(1 + m_f w_{2,kg}\right)} \tag{18}$$

โดยที่ Ah คือ ความจุไฟฟ้าสมมูลของอิเล็กโตรไลท์ (Ampere hour)

$w_{1,kg}$ คือ น้ำหนักของ H_2SO_4 จำนวน 1 โมล = 0.09807948 kg

$w_{2,kg}$ คือ น้ำหนักของน้ำจำนวน 1 โมล = 0.01800988 kg

m_i คือ โมแลลลิตีของสารละลายน้ำกรดเริ่มต้น (mol/kg)

m_f คือ โมแลลลิตีของสารละลายน้ำกรดหลังทำปฏิกิริยา (mol/kg)

B_i คือ น้ำหนักของสารละลายน้ำกรดเริ่มต้น (kg)

เมื่อแบตเตอรี่ใหม่ (B_n, m_n, D_n) จะมีความจุ Ah_n ดังนี้

$$Ah_n = 26.802 x B_n \frac{m_n - m_f}{\left(1+m_n w_{1,kg}\right)\left(1+m_f w_{2,kg}\right)} \tag{19}$$

เมื่อแบตเตอรี่เสื่อม (B_d, m_d, D_d) จะมีความจุ Ah_d ดังนี้

$$Ah_d = 26.802 x B_d \frac{m_d - m_f}{\left(1+m_d w_{1,kg}\right)\left(1+m_f w_{2,kg}\right)} \tag{20}$$

อัตราส่วนความจุของแบตเตอรี่เสื่อมเทียบกับแบตเตอรี่ใหม่

$$\frac{(20)}{(19)} \qquad \frac{Ah_d}{Ah_n} = \frac{B_d}{B_n} \frac{\left(m_d - m_f\right)\left(1+m_n w_{1,kg}\right)}{\left(m_n - m_f\right)\left(1+m_d w_{1,kg}\right)} \tag{21}$$

อัตราส่วนความจุของแบตเตอรี่จะสัมพันธ์กับอัตราส่วนความนำผ่านทางสมการที่ (22) จากสมการที่ (9)

$$\frac{G_d}{G_n} = \left(\frac{g_d}{g_n}\right)\left(\frac{D_n}{D_d}\right)\left[\frac{B_d}{B_n}\right] \tag{22}$$

โดยที่ B_d ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขในหัวข้อ 3.2.4) กล่าวคือ อยู่ในเงื่อนไขของสมการที่ (16) และ(17) จากสมการที่ (16),(17),(21) และ (22) จะให้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความจุกับอัตราส่วนความนำ โดยเส้นขอบเขตด้านบนคือเงื่อนไข

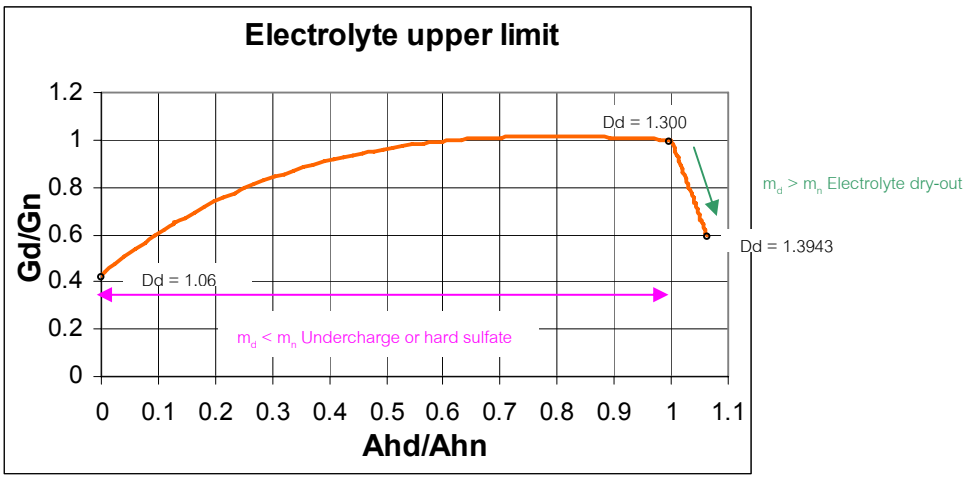
จากสมการ 16 $$B_{d,b} = \frac{B_n m_n}{m_n w_{1,kg} + 1} \frac{m_d w_{1,kg} + 1}{m_d}; m_d \geq m_n \tag{23}$$

จากสมการ 17 $$B_{d,b} = B_n \frac{\left(m_d w_{1,kg} + 1\right)}{\left(m_n w_{1,kg} + 1\right)}; m_d < m_n \tag{24}$$

รูปที่ 7 แสดงเส้นขอบเขตด้านบนของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความจุของอิเล็กโตรไลท์กับอัตราส่วนความนำโดยมี m_d, D_d เป็นตัวแปรอิสระซึ่งจะให้ความสัมพันธ์แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ

- ช่วง $m_d < m_n$ ($D_d < D_n$) ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิด Undercharge ในแบตเตอรี่
- ช่วง $m_d \geq m_n$ ($D_d \geq D_n$) ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิด Dry out ในแบตเตอรี่

บริเวณพื้นที่ภายใต้เส้นขอบเขตจะสัมพันธ์กับกรณีที่ $B_d < B_{d,b}$ ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดขึ้นได้เมื่อเกิดการเสื่อมลงของอิเล็กโตรไลท์ บริเวณพื้นที่เหนือเส้นขอบเขตด้านบนนั้นไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความจุกับความนำ (ความสัมพันธ์เหนือเส้นขอบเขตด้านบนไม่สามารถอธิบายได้จากการคำนวณนี้)



รูปที่ 7 ขอบเขตด้านบนของความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความจุของอิเล็กโตรไลท์กับอัตราส่วนความนำโดยมี m_d, D_d เป็นตัวแปรอิสระ (D_n = 1.300 , m_n = 6.81 mol/kg , B_n =0.011029 kg , m_f = 1.06 mol/kg)

5) การแห้งลงของอิเล็กโตรไลท์(Dry-out)

อิเล็กโตรไลท์ของแบตเตอรี่ประกอบด้วย H_2SO_4 และน้ำ ปริมาณน้ำในอิเล็กโตรไลท์จะลดลงเมื่อแบตเตอรี่มีอายุมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากหลายสาเหตุ เช่น ปฏิกิริยาแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Hydrolysis) ซึ่งจะแยกน้ำกลายเป็นก๊าซ H_2 ,O_2 และการระเหยของน้ำทั้งจากสภาพปกติและจากการรั่วซึมของซีล เป็นต้น

5.1) สมมติฐานของการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กโตรไลท์เมื่อเกิดการ Dry-out

5.1.1) เมื่อปริมาณน้ำในอิเล็กโตรไลท์ลดน้อยลงจะส่งผลให้ปริมาตรของอิเล็กโตรไลท์ลดลงและความเข้มข้นของ H_2SO_4 ในอิเล็กโตรไลท์สูงขึ้น

5.1.2) เนื่องจากแรงดัน Open circuit voltage (OCV) ของแบตเตอรี่จะสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ H_2SO_4 สูงขึ้น แต่เนื่องจากแบตเตอรี่ถูกชาร์จด้วยแรงดัน Float ดังนั้นแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่จึงถูกจำกัดไว้ด้วยแรงดันชาร์จเจอร์ ส่งผลให้ความเข้มข้นสูงสุดของอิเล็กโตรไลท์ถูกจำกัดไว้ด้วยค่าที่สัมพันธ์กับแรงดัน Float

เมื่อกำหนดให้แรงดัน Float คงที่อยู่ที่ 2.25 V/cell แรงดัน OCV สูงที่สุดของแบตเตอรี่จะถูกจำกัดไว้ที่ 2.25 V/cell ซึ่งจะสอดคล้องกับความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลท์ $m_{d,m}$ = 10.3 mol/kg หรือความหนาแน่น $D_{d,m}$ = 1.3943 Kg/liter $OCV_m \approx 2.25V$

5.1.3) ในกรณีที่ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลท์ต่ำกว่า $D_{d,m}$, $m_{d,m}$ นั้นยังไม่สามารถระบุได้ว่ามีการสูญเสีย H_2SO_4 ดังนั้นในเบื้องต้นที่ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลท์อยู่ในช่วง $m_n \le m_d < m_{d,m}$ จึงสมมุติให้ยังไม่มีการสูญเสีย H_2SO_4 ในอิเล็กโตรไลท์

5.1.4) เมื่ออิเล็กโตรไลท์สูญเสียน้ำมากขึ้นจนความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลท์สูงขึ้นถึงระดับ $D_{d,m}$, $m_{d,m}$ ถ้ายังมีการสูญเสียน้ำต่อไปอีก อิเล็กโตรไลท์จะรักษาระดับความเข้มข้นไว้ที่ $D_{d,m}$, $m_{d,m}$ โดยการลดปริมาณ H_2SO_4 ในอิเล็กโตรไลท์ลง โดยที่ H_2SO_4 ส่วนเกินในอิเล็กโตรไลท์จะไปจับตัวกับแผ่นธาตุ เกิดเป็นตะกั่วซัลเฟต ($PbSO_4$) (อาจกล่าวได้ว่าในสภาวะนี้แบตเตอรี่อยู่ในสภาวะ Undercharge คือแรงดันไม่สูงพอที่จะรักษาเสถียรภาพ หรือชดเชยการ Self discharge ของแบตเตอรี่ได้)

5.2) ความนำและความจุไฟฟ้าสมมูลของอิเล็กโตรไลท์ที่ความเข้มข้น $m_n \le m_d < m_{d,m}$

หัวข้อนี้อิงตามสมมติฐาน 5.1.3) คือไม่มีการสูญเสีย H_2SO_4 ในอิเล็กโตรไลท์ เมื่อแบตเตอรี่ใหม่มีน้ำหนักของอิเล็กโตรไลท์ B_n มีความเข้มข้นเป็นโมแลลลิตีเท่ากับ m_n จะมีน้ำหนักของ H_2SO_4 จากสมการที่ (10),(11) เท่ากับ

$$B_{A,n} = \frac{B_n m_n w_{1,kg}}{m_n w_{1,kg} + 1} (kg)$$

และมีน้ำหนักของน้ำเท่ากับ

$$B_{H,n} = \frac{B_n}{m_n w_{1,kg} + 1} (kg)$$

โดยที่ $w_{1,kg}$ คือน้ำหนักของ H_2SO_4 จำนวน 1 โมล = 0.09807948 kg

กำหนดให้ $B_{H,d}$ คือปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในอิเล็กโตรไลท์
ความเข้มข้นเป็นโมแลลลิตีของอิเล็กโตรไลท์หาได้จาก

$$m_d = \frac{\text{น้ำหนัก } H_2SO_4 / \ w_{1,kg}}{\text{น้ำหนัก } H_2O}$$

$$m_d = \frac{B_{A,n} / w_{1,kg}}{B_{H,d}}$$

สำหรับความหนาแน่นสามารถคำนวณได้จากสูตรในภาคผนวก ก

เมื่อกำหนดให้แบตเตอรี่ใหม่มี

$$B_n = 0.011029kg/Ah\,,\ m_n = 6.81mol/kg\,,\ D_n = 1.300kg/liter\,,\ g_n = 76.81\Omega^{-1}m^{-1}$$

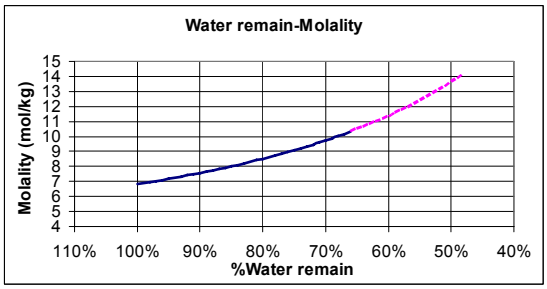
$$B_{A,n} = \frac{0.011029x6.81x0.09807948}{6.81x0.09807948+1} = 0.00441658kg$$

$$B_{H,n} = \frac{0.011029}{6.81x0.09807948+1} = 0.00661242kg$$

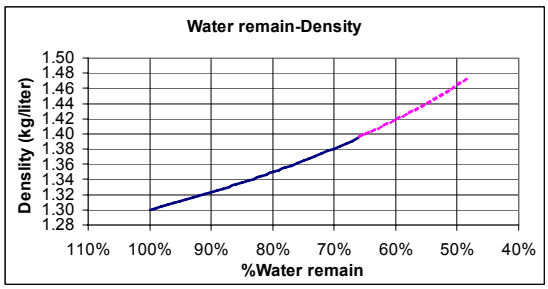
ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นเป็นโมแลลลิตีกับสัดส่วนของน้ำที่เหลืออยู่แสดงในรูปที่ 8

เส้นทึบแสดงค่าที่ความเข้มข้นน้อยกว่า10.3 และความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า1.3943

เส้นประแสดงค่าที่ความเข้มข้นมากกว่า10.3 และความถ่วงจำเพาะมากกว่า1.3943 ซึ่งขัดกับสมมติฐาน 5.1.2



ก) ความเข้มข้นเป็นโมแลลลิตี



ข) ความหนาแน่น

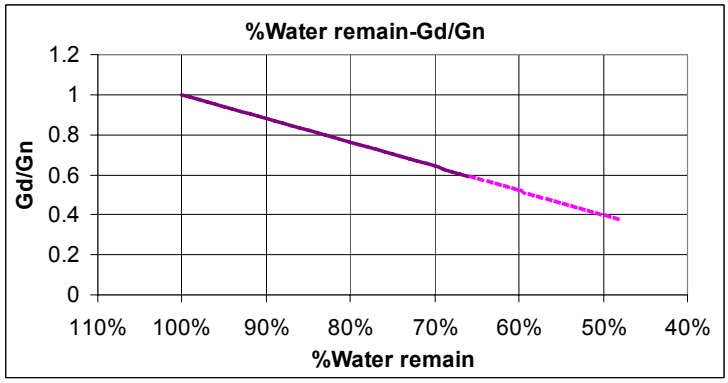
รูปที่ 8 ความเข้มข้นและความหนาแน่นของอิเล็กโตรไลท์เทียบกับสัดส่วนปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ที่ความเข้มข้น $m_n \le m_d < m_{d,m}$

5.2.1) ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความนำกับสัดส่วนปริมาณน้ำที่เหลืออยู่

การเปลี่ยนแปลงของความนำเมื่อมีการสูญเสียน้ำ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9) โดยค่า B_d หาได้จาก

น้ำหนักของอิเล็กโตรไลท์ B_d = น้ำหนักของ H_2SO_4 + น้ำหนักของน้ำ (ที่เหลืออยู่)

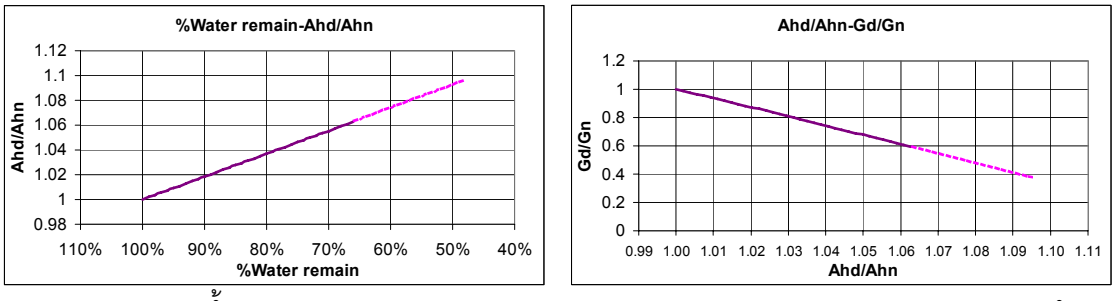
$$B_d = B_{A,n} + B_{H,d}$$



รูปที่ 9 อัตราส่วนความนำเทียบกับสัดส่วนปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ที่ความเข้มข้น $m_n \le m_d < m_{d,m}$

รูปที่ 9 แสดงอัตราส่วนความนำเทียบกับสัดส่วนปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่ออิเล็กโตรไลท์ dry-out ลง ความนำของแบตเตอรี่จะลดลงด้วย ดังนั้นโดยการวัดค่าความนำจึงสามารถบอกได้ถึงระดับการ dry-out ของอิเล็กโตรไลท์ได้

5.2.2) ความสัมพันธ์ของอิเล็กโตรไลท์ที่ความเข้มข้น $m_n \le m_d < m_{d,m}$ กับความจุของอิเล็กโตรไลท์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (21) และ (22) ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 10 รูปที่ 10ก แสดงว่าเมื่อน้ำในแบตเตอรี่ลดลง ความจุไฟฟ้าสมมูลของอิเล็กโตรไลท์จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากความเข้มข้นของ H_2SO_4 เพิ่มมากขึ้นทำให้อัตราการใช้ประโยชน์ของ H_2SO_4 เพิ่มมากขึ้นด้วย รูปที่ 10ข แสดงอัตราส่วนความจุกับอัตราส่วนความนำ (กราฟนี้เป็นส่วนหนึ่งของรูปที่ 7 กรณี $m_d > m_n$)

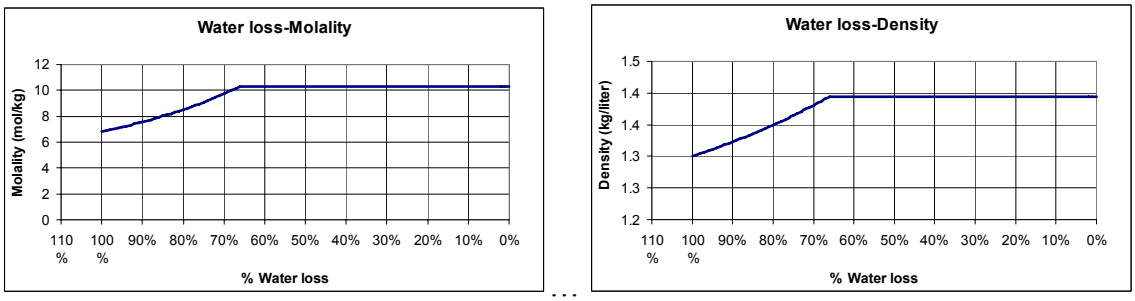


ก) สัดส่วนของน้ำกับอัตราส่วนความจุ ข) อัตราส่วนความจุกับอัตราส่วนความนำ

รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของอิเล็กโตรไลท์ที่ความเข้มข้น $m_n \le m_d < m_{d,m}$ กับความจุของอิเล็กโตรไลท์

5.3) ความนำและความจุไฟฟ้าสมมูลของอิเล็กโตรไลท์ที่ความเข้มข้น $m_{d,m}$

หัวข้อนี้อิงตามสมมติฐาน 5.1.2) และ 5.1.4) คือความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลท์คงที่ที่ $m_{d,m}$ = 10.3 mol/kg หรือความหนาแน่น $D_{d,m}$ = 1.3943 Kg/liter จุดเริ่มต้นของความเข้มข้นนี้จะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในอิเล็กโตรไลท์ลดลงเหลือ 66% เทียบกับปริมาณน้ำในแบตเตอรี่ใหม่ เมื่อปริมาณน้ำในอิเล็กโตรไลท์ลดลงไปอีกปริมาณของ H_2SO_4 ในอิเล็กโตรไลท์จะลดลงไปด้วย ที่ความเข้มข้นนี้จะมีอัตราส่วนน้ำหนักของ H_2SO_4 กับน้ำเป็น1:1



ก) ความเข้มข้นเป็นโมแลลลิตี ข) ความหนาแน่น

รูปที่ 11 ความเข้มข้นและความหนาแน่นของอิเล็กโตรไลท์เทียบกับสัดส่วนปริมาณน้ำที่เหลืออยู่

5.3.1) ข้อจำกัดของน้ำหนักอิเล็กโตรไลท์

พิจารณาเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.2.4) กรณีที่ 1 สมการที่ (16) โดยที่ $m_d = m_{d,m}$ และ $B_{d,b} = B_{d,m}$ ในสภาวะที่ความเข้มข้นเท่ากับ $m_{d,m}$ อิเล็กโตรไลท์จะมีน้ำหนักได้สูงที่สุดคือ $B_{d,m}$ ดังสมการ

$$B_{d,m} = \frac{B_n m_n}{m_n w_{1,kg} + 1} \frac{m_{d,m} w_{1,kg} + 1}{m_{d,m}} \tag{25}$$

ที่น้ำหนัก $B_{d,m}$ ปริมาณ H_2SO_4 จะยังเท่ากับปริมาณ H_2SO_4 ในแบตเตอรี่ใหม่

5.3.2) ความสัมพันธ์ของอิเล็กโตรไลท์ที่ความเข้มข้น $m_{d,m}$ กับความจุของอิเล็กโตรไลท์

พิจารณาเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4

จากสมการที่ (21) อัตราส่วนความจุของแบตเตอรี่เสื่อมเทียบกับแบตเตอรี่ใหม่

แทน m_d ด้วย $m_{d,m}$

$$\frac{A_{hd}}{A_{hn}} = \frac{B_d}{B_n} \frac{\left(m_{d,m} - m_f\right)\left(1 + m_n w_{1,kg}\right)}{\left(m_n - m_f\right)\left(1 + m_{d,m} w_{1,kg}\right)} \tag{26}$$

จากสมการที่ (9) เมื่อจัดรูปใหม่และแทน $D_d = D_{d,m}$, $g_d = g_{d,m}$ จะได้

$$\frac{B_d}{B_n} = \left(\frac{g_n}{g_{d.m}}\right)\left(\frac{D_{d,m}}{D_n}\right)\left[\frac{G_d}{G_n}\right] \tag{27}$$

โดยที่ $g_{d,m}$ คือความนำจำเพาะที่ความเข้มข้น $m_{d,m}$ เมื่อแทนสมการที่ (27) ลงในสมการที่ (26) จะได้ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความจุกับอัตราส่วนความนำดังนี้

$$\frac{A_{hd}}{A_{hn}} = \left(\frac{g_n}{g_{d.m}}\right)\left(\frac{D_{d,m}}{D_n}\right)\left(\frac{\left(m_{d,m} - m_f\right)\left(1 + m_n w_{1,kg}\right)}{\left(m_n - m_f\right)\left(1 + m_{d,m} w_{1,kg}\right)}\right)\left[\frac{G_d}{G_n}\right] \tag{28}$$

ในสมการที่ (28) จะพบว่า $g_n, g_{d,n}, D_{d,m}, D_n, m_{d,m}, m_n, m_f$ ล้วนเป็นค่าคงที่ ดังนั้น อัตราส่วนความจุ $\frac{A_{hd}}{A_{hn}}$ จึงแปรผันตรงกับอัตราส่วนความนำ $\frac{G_d}{G_n}$

เมื่อกำหนดให้แบตเตอรี่ใหม่ (ภาคผนวก ข แบตเตอรี่แบบ AGM)

$B_n = 0.011029 kg/Ah$, $m_n = 6.81 mol/kg$, $D_n = 1.300 kg/liter$, $g_n = 76.81 \Omega^{-1} m^{-1}$

เมื่อแบตเตอรี่ Dry-out

$m_{d,m} = 10.3 mol/kg$, $D_{d,m} = 1.3943 kg/liter$, $g_{d,m} = 61.37 \Omega^{-1} m^{-1}$

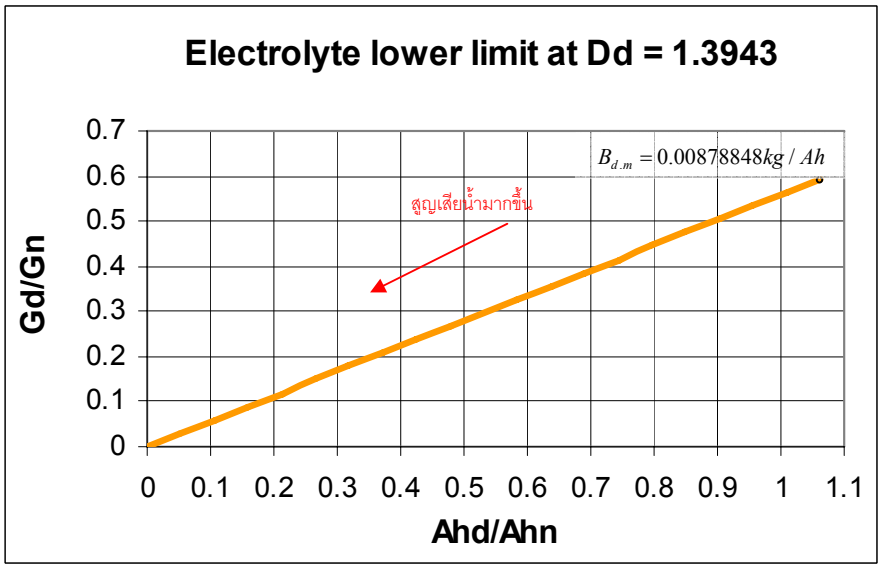
และให้ $m_f = 1.06 mol/kg$

เมื่อแทนในสมการที่ (25) จะได้ $B_{d,m} = 0.00878848 kg / Ah$ ซึ่งจุดนี้จะยังไม่มีการสูญเสีย H_2SO_4 ในอิเล็กโตรไลท์ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (27) จุดนี้จะมี $\frac{G_{d,m}}{G_n} = 0.59359$ และ $\frac{A_{hd}}{A_{hn}} = 1.0625$ เมื่ออิเล็กโตรไลท์มีการสูญเสียน้ำอีกจะมีความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความจุและอัตราส่วนความนำของอิเล็กโตรไลท์ดังนี้ แทนค่าสมการที่ (28)

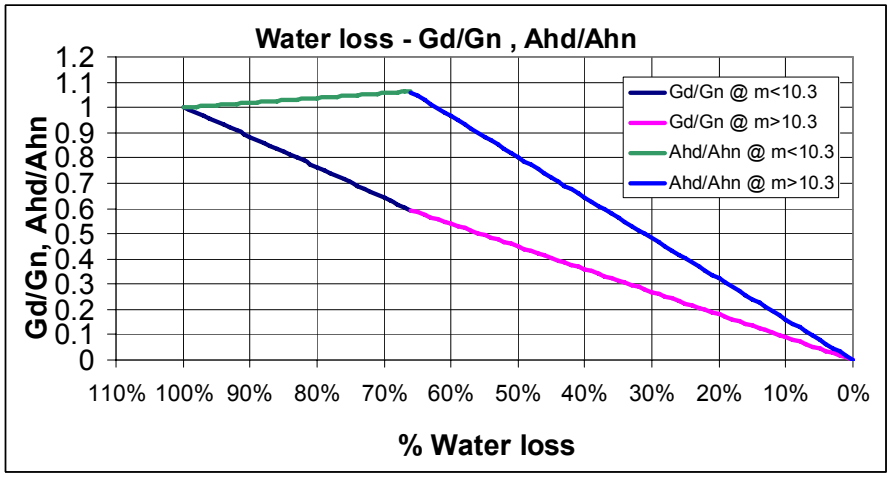
$$\frac{A_{hd}}{A_{hn}} = \left(\frac{76.81}{61.37}\right)\left(\frac{1.3943}{1.300}\right)\left(\frac{(10.3-1.06)(1+6.81x0.09807948)}{(6.81-1.06)(1+10.3x0.09807948)}\right)\left[\frac{G_d}{G_n}\right]$$

$$\frac{A_{hd}}{A_{hn}} = 1.78988\left[\frac{G_d}{G_n}\right]$$

สมการนี้จะให้ขอบเขตด้านล่างของความสัมพันธ์ ระหว่างอัตราส่วนความจุกับอัตราส่วนความนำ นั่นคือบริเวณภายใต้กราฟรูปที่ 12 นั้น จะไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความจุกับอัตราส่วนความนำ (ความสัมพันธ์ใต้ขอบเขตด้านล่างไม่สามารถอธิบายได้จากการคำนวณนี้)

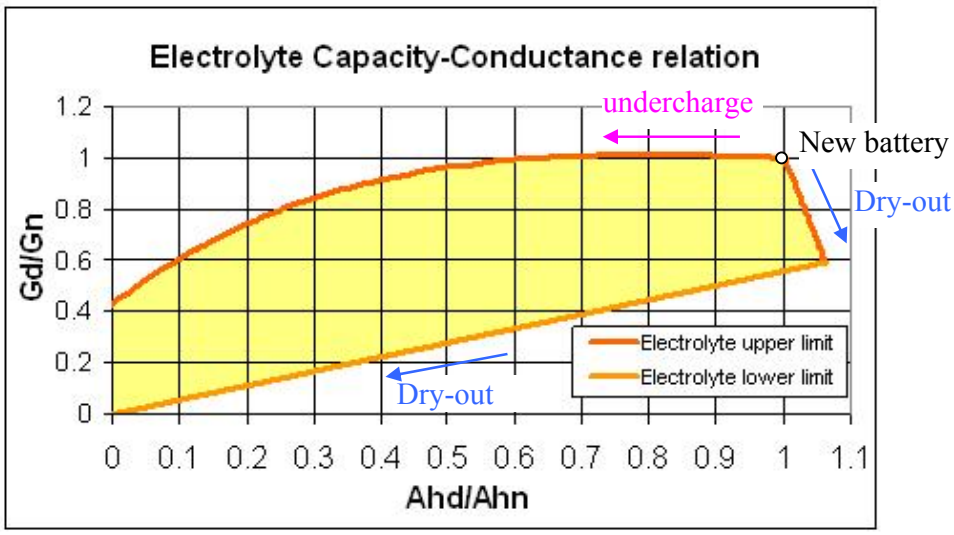


รูปที่ 12 ขอบเขตด้านล่างของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความจุของอิเล็กโตรไลท์กับอัตราส่วนความนำกรณี Dry-out



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปริมาณน้ำที่เหลืออยู่กับอัตราส่วนความจุของอิเล็กโตรไลท์และอัตราส่วนความนำกรณี Dry-out

เมื่อนำขอบเขตด้านบนที่ได้จากหัวข้อที่ 4) รูปที่ 7 มาประกอบกับขอบเขตด้านล่างรูปที่ 12 จะได้ขอบเขตความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 14 โดยพื้นที่ที่แรเงาเป็นพื้นที่ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความจุกับอัตราส่วนความนำของแบตเตอรี่ เมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนของอิเล็กโตรไลท์



รูปที่ 14 แสดงพื้นที่ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความจุของอิเล็กโตรไลท์กับอัตราส่วนความนำเมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนของอิเล็กโตรไลท์

6) ความสัมพันธ์ของแผ่นธาตุกับความจุและขีดจำกัดของความจุของแผ่นธาตุ

ความจุไฟฟ้าสมมูลของแผ่นธาตุขึ้นอยู่กับปริมาณของแผ่นธาตุจากภาคผนวก ข จะให้ความสัมพันธ์ของน้ำหนักประสิทธิผลของแผ่นธาตุต่อ Ah ดังนี้

จำนวนโมลของ $PbO_2 = \frac{1}{53.604x0.4} = 0.04663831$ mole/Ah

จำนวนโมลของ $Pb = \frac{1}{53.604x0.45} = 0.041456$ mole/Ah

หรือคิดเป็นน้ำหนักคือ

น้ำหนักของ PbO_2 = 11.155 g/Ah

น้ำหนักของ Pb = 8.589 g/Ah

6.1) สมมติฐานของการเกิดตะกั่วซัลเฟตบนแผ่นธาตุ

6.1.1) การเปลี่ยนแปลงในอิเล็กโตรไลท์จะสัมพันธ์กับการเกิดตะกั่วซัลเฟต ($PbSO_4$) บนแผ่นธาตุ เนื่องจากไอออน SO_4^{2-} นั้นจะมาจาก H_2SO_4 ในอิเล็กโตรไลท์ ดังนั้นปริมาณของ H_2SO_4 ที่หายไปจากอิเล็กโตรไลท์จึงสัมพันธ์กับปริมาณของตะกั่วซัลเฟตที่แผ่นธาตุ

6.1.2) ตะกั่วซัลเฟตสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนแผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบ แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติแผ่นธาตุลบมักจะมีปัญหาการเสื่อมเนื่องจากตะกั่วซัลเฟตมากกว่าแผ่นธาตุบวก ทั้งนี้ส่วนหนึ่งอาจเนื่องมาจากกระบวนการรวมตัวกันของก๊าซเป็นน้ำ (Recombination) เกิดขึ้นที่แผ่นธาตุลบ

$$Pb + \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + SO_4^{2-} = H_2O + PbSO_4$$

ดังนั้นเพื่อความง่ายในการคำนวณขีดจำกัดของแผ่นธาตุจึงได้ให้ตะกั่วซัลเฟตเกิดขึ้นที่แผ่นธาตุลบเท่านั้น

6.2) ปริมาณตะกั่วซัลเฟตที่เกิดบนแผ่นธาตุและความจุ

เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงในอิเล็กโตรไลท์ H_2SO_4 ที่หายไปจากอิเล็กโตรไลท์ จะไปเกิดเป็นตะกั่วซัลเฟตที่แผ่นธาตุโดยมีความสัมพันธ์เป็นแบบ 1:1 คือ

ปฏิกิริยาเคมีที่แผ่นธาตุลบ $Pb + H_2SO_4 \rightarrow PbSO_4 + H_2^+$

โมล $PbSO_4$ บนแผ่นธาตุ = โมล H_2SO_4 Loss

โมล H_2SO_4 ที่สูญเสียไปจากอิเล็กโตรไลท์คำนวณได้จาก

โมล H_2SO_4 Loss = โมล H_2SO_4 ในแบตเตอรี่ใหม่ – โมล H_2SO_4 ในแบตเตอรี่เสื่อม

$$\text{โมล } H_2SO_4 \text{ Loss} = \frac{B_i m_i}{m_i w_{1,kg} + 1} - \frac{B_d m_d}{m_d w_{1,kg} + 1} \qquad (28)$$

จากสมมติฐานที่ให้ ตะกั่วซัลเฟตเกิดขึ้นเฉพาะที่แผ่นธาตุลบ
แบตเตอรี่เสื่อมจึงมีปริมาณ Pb เหลืออยู่เท่ากับ

$$โมล Pb_d = โมล Pb_n - โมล H_2SO_4 Loss \quad (29)$$

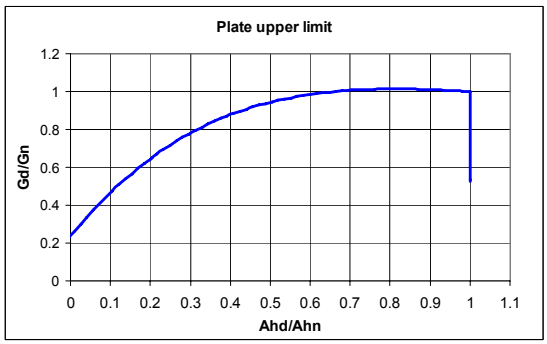
โดยที่ Pb_d คือปริมาณของตะกั่วที่เหลืออยู่ที่แผ่นธาตุลบเมื่อแบตเตอรี่เสื่อม

Pb_n คือปริมาณของตะกั่วที่มีในแบตเตอรี่ใหม่

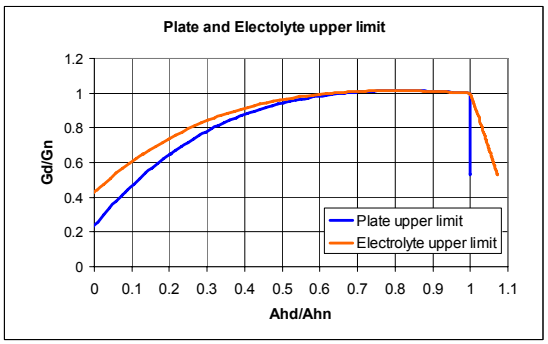
เนื่องจากความจุของแผ่นธาตุแปรผันตรงกับปริมาณของ Pb ดังนั้นอัตราส่วนของ Pb ที่เหลืออยู่ต่ออัตราส่วน Pb ของแบตเตอรี่ใหม่ จะเท่ากับอัตราส่วนของ Ah ที่เหลืออยู่ต่อ Ah ของแบตเตอรี่ใหม่ ดังสมการ

$$\frac{Ah_{d,Pb}}{Ah_{n,Pb}} = \frac{Pb_d}{Pb_n} = \frac{โมล Pb_d}{โมล Pb_n} \quad (30)$$

เนื่องจากปริมาณ $PbSO_4$ ที่เกิดบนแผ่นธาตุสัมพันธ์กับปริมาณการสูญเสีย H_2SO_4 ในอิเล็กโตรไลท์ ดังนั้นการคำนวณความจุแผ่นธาตุจึงอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ถูกกำหนดจากอิเล็กโตรไลท์ด้วย (หัวข้อ3-5)



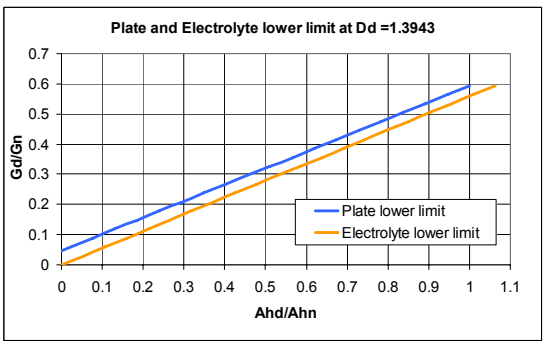
ก.แผ่นธาตุ



ข.แผ่นธาตุและอิเล็กโตรไลท์

รูปที่ 15 ขอบเขตด้านบนของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความจุของแผ่นธาตุกับอัตราส่วนความนำ โดยมี m_d, D_d เป็นตัวแปรอิสระ ($Pb = 8.589g$ หรือเท่ากับ 0.041456 mole)

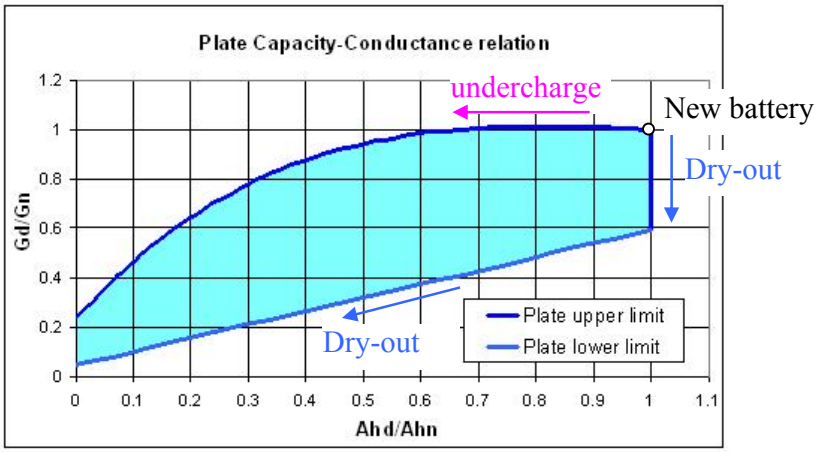
ก.แผ่นธาตุ



ข.แผ่นธาตุและอิเล็กโตรไลท์

รูปที่ 16 ขอบเขตด้านล่างของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความจุกับอัตราส่วนความนำกรณี Dry-out ($Pb = 8.589g$ หรือเท่ากับ 0.041456 mole)

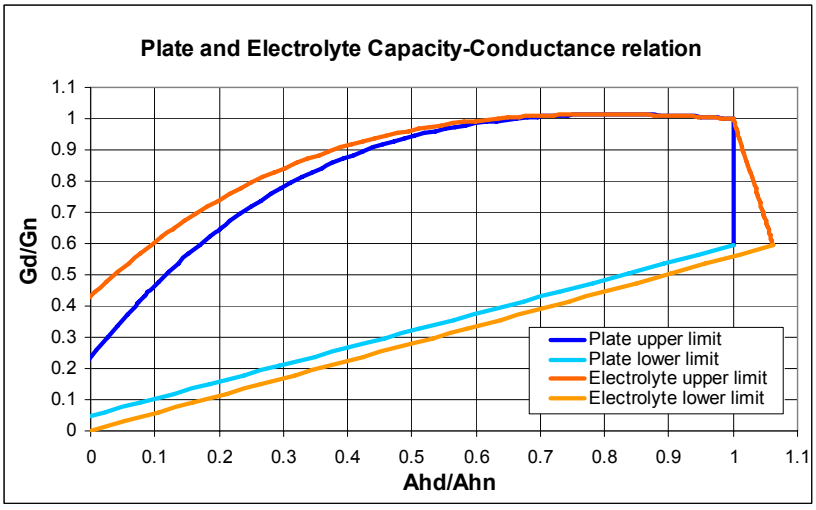
เมื่อนำขอบเขตด้านบนที่ได้จากรูปที่ 15ก มาประกอบกับขอบเขตด้านล่างรูปที่ 16ก จะได้ขอบเขตความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 17 โดยพื้นที่ที่แรเงาเป็นพื้นที่ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความจุกับอัตราส่วนความนำของแบตเตอรี่ เมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนของแผ่นธาตุ



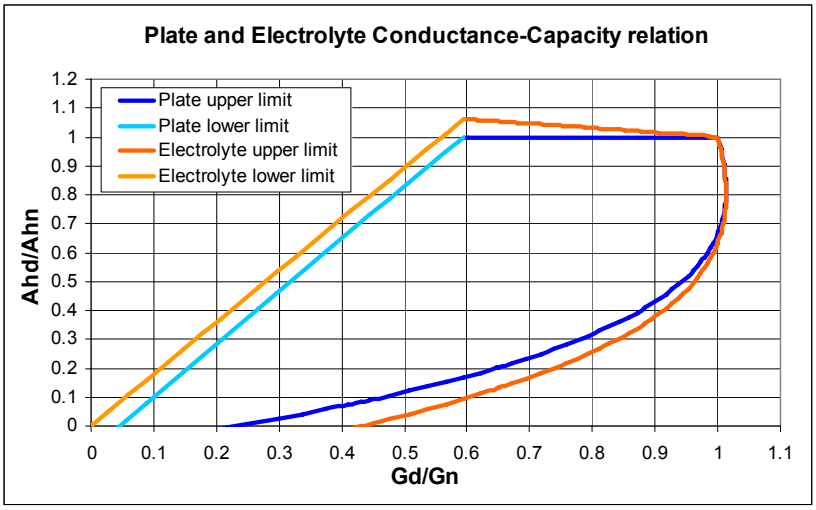
รูปที่ 17 แสดงพื้นที่ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความจุกับอัตราส่วนความนำของแบตเตอรี่เมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนของแผ่นธาตุ

7) **วิเคราะห์ผลการคำนวณ**

เมื่อนำผลที่ได้จากหัวข้อ 3-6 มารวมกันจะได้ขอบเขตความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความจุกับความนำดังแสดงในรูปที่ 18 โดยบริเวณที่ถูกตีกรอบด้วยขอบเขตต่างๆ เป็นพื้นที่ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับความนำ เนื่องจากค่าอัตราส่วนความจุกับความนำที่คำนวณได้จากอิเล็กโตรไลท์และแผ่นธาตุนั้นเป็นค่าที่ได้จากสภาวะเดียวกัน ดังนั้นขอบเขตใดที่ให้ความจุต่ำกว่าจะเป็นตัวกำหนดขอบเขตความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความจุกับความนำ ดังแสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 18ก ขอบเขตความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับความนำ



รูปที่ 18ข ขอบเขตความสัมพันธ์ระหว่างความนำกับความจุ

รูปที่ 18 ขอบเขตของความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับความนำจากอิเล็กโตรไลท์และแผ่นธาตุ

จากรูปที่ 19 ได้ให้ข้อสังเกตดังนี้

การเกิด undercharge กับการเกิด dry-out จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำที่แตกต่างกัน คือ

- เมื่อเกิด undercharge ไม่รุนแรง ค่าความนำอาจจะสูงขึ้นเล็กน้อยหรือคงที่ แต่กลับให้ความจุที่ลดลงอย่างมาก (เส้นขอบเขตบนของอิเล็กโตรไลท์ในรูปที่ 19) ดังนั้นการวินิจฉัยถึงสุขภาพของแบตเตอรี่ด้วยค่าความนำเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอและอาจนำไปสู่ข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ จะต้องพิจารณาองค์ประกอบอื่นด้วยเช่น แรงดัน float , แรงดัน OCV เป็นต้น
- เมื่อเกิด dry-out ค่าความนำจะต่ำลง แต่ความจุอาจจะยังไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก (เส้นขอบเขตบนและขอบเขตล่างของแผ่นธาตุรูปที่ 19) ถ้าพิจารณาว่าการ dry-out เกิดอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอในแบตเตอรี่ ค่าความนำของแบตเตอรี่จะมีแนวโน้มลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นตามเวลา คล้ายดังกราฟในรูปที่ 13

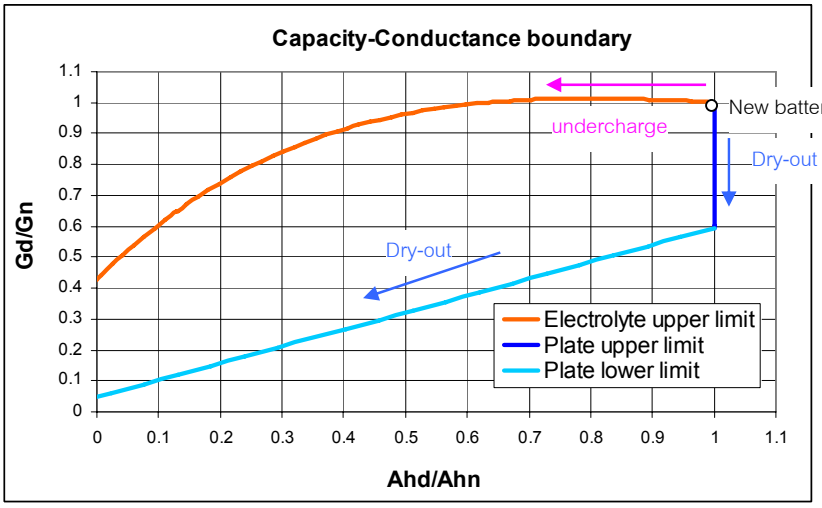
การเปลี่ยนแปลงภายในแบตเตอรี่ ที่ทำให้ปริมาณ H_2SO_4 ในอิเล็กโตรไลต์ลดลง ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงบางอย่างเช่น การผุกร่อน ที่อาจจะใช้ H_2SO_4 ในอิเล็กโตรไลต์ไปในปฏิกิริยาเช่น Strap corrosion ทำให้ปริมาณ H_2SO_4 ในอิเล็กโตรไลต์ลดลง ซึ่งในกรณีนี้ทำให้ค่าความนำอาจจะยังสูงอยู่ แต่ความจุของแบตเตอรี่ต่ำมากได้ ซึ่งกรณีนี้จะมีความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับความนำใกล้เคียงกับกรณีการเกิด undercharge

เมื่อพิจารณาว่าค่าอัตราส่วนความนำบ่งบอกถึงความจุของแบตเตอรี่อย่างไรนั้น จะพบว่า

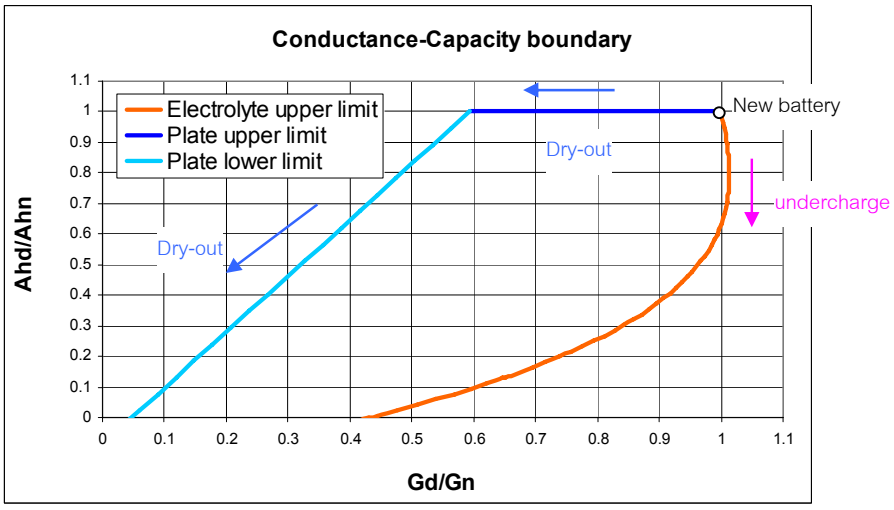
-เมื่อพิจารณาเฉพาะค่าความนำเพียงอย่างเดียวจะไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่าแบตเตอรี่มีความจุเท่าใด เช่นที่ $\frac{G_d}{G_n} = 80\%$ รูปที่ 19ก สามารถบอกได้ว่าแบตเตอรี่มีความจุ 25 -100%

(แต่อย่างไรก็ตามขอบเขตบนนั้นเป็นขอบเขตที่สร้างขึ้นมาจากปริมาณH_2SO_4 และน้ำในแบตเตอรี่ใหม่ แต่ในทางปฏิบัติ ปริมาณของสารเหล่านี้จะลดลงเมื่อแบตเตอรี่มีอายุมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ขอบเขตนี้แคบลงจนสุดท้ายขอบเขตอาจจะอยู่ที่เงื่อนไขการ Dry-out)

- ที่ช่วงความนำ $\frac{G_d}{G_n} < 60\%$ ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความจุกับความนำจะถูกจำกัดที่ขอบเขตล่างของแผ่นธาตุเมื่อเกิดการ Dry-out ดังนั้นในช่วงความนำ $\frac{G_d}{G_n} < 60\%$ จะให้อัตราส่วนความจุน้อยกว่า 100%



รูปที่ 19ก ขอบเขตความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับความนำ



รูปที่ 19ข ขอบเขตความสัมพันธ์ระหว่างความนำกับความจุ

รูปที่ 19 ขอบเขตความสัมพันธ์ระหว่างความจุด้านต่ำกับความนำ

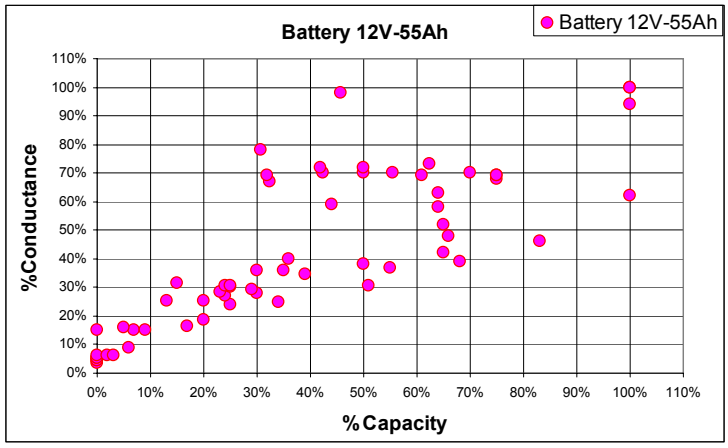
8) **ผลการทดสอบแบตเตอรี่**

ได้ทำการทดสอบคายประจุแบตเตอรี่ด้วยกระแสคงที่ แบตเตอรี่มีขนาด 12 V ความจุ 55 Ah อายุ 2 ปี จำนวน 61 ลูก ที่อัตราการคายประจุ 4 ชั่วโมง กระแส 10.1 Amp แรงดันสุดท้าย 1.8 V/cell (10.8V/block) โดยก่อนการทดสอบได้ทำการชาร์จแบตเตอรี่ด้วยแรงดันคงที่ 13.5 V เป็นเวลา 3 วัน พร้อมทั้งได้วัดค่าความนำแบตเตอรี่หลังชาร์จ ซึ่งมีผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 15 โดย $A_{hn} = 40.4Ah$ และ $G_n = 800Siemens$

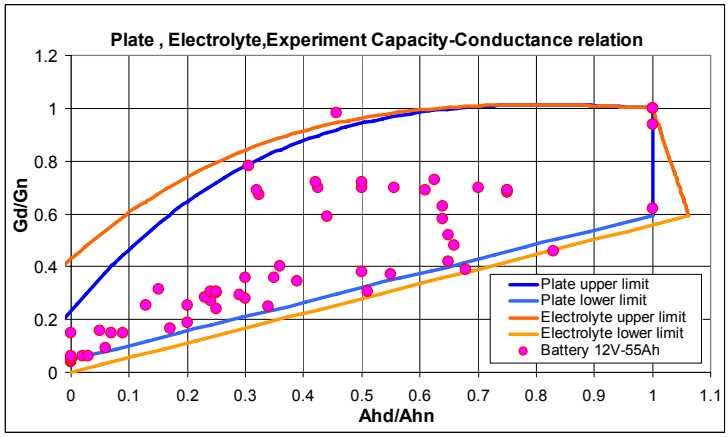
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบความจุและความนำของแบตเตอรี่ 12V 55Ah

Block	%Conductance	% Capacity
1	3.75	0
2	4.5	0
3	4.5	0
4	5.25	0
5	5.25	0
6	6	0
7	6	2
8	6	3
9	9	6
10	15	0
11	15	7
12	15	9
13	15.75	5
14	16.5	17
15	18.75	20
16	24	25
17	24.75	34
18	25.5	13
19	25.5	20
20	27	24
21	27.75	30
22	28.5	23
23	29.25	29
24	30	25
25	30.75	24
26	30.75	25
27	30.75	51
28	31.5	15
29	34.5	39
30	36	30
31	36	35

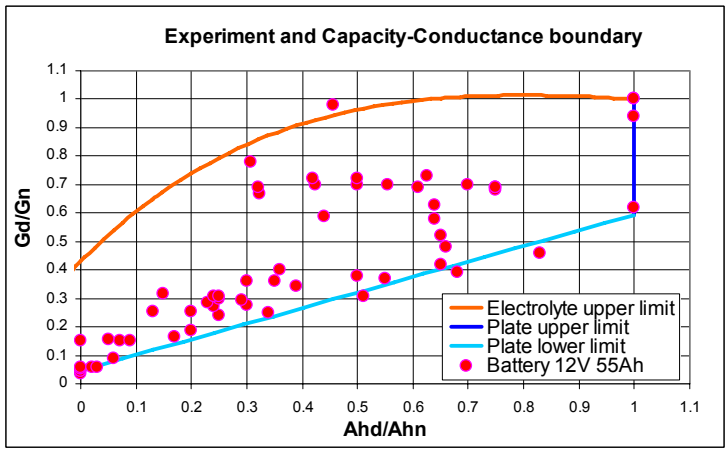
Block	%Conductance	% Capacity
32	37	55
33	38	50
34	39	68
35	40	36
36	42	65
37	46	83
38	48	66
39	52	65
40	58	64
41	59	44
42	62	100
43	63	64
44	67	32.3
45	68	75
46	69	32
47	69	61
48	69	75
49	69	75
50	70	42.44
51	70	50
52	70	55.5
53	70	70
54	72	42
55	72	50
56	73	62.5
57	78	30.6
58	94	100
59	98	45.7
60	100	100
61	100	100



รูปที่ 20ก ผลการทดสอบโดยการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความจุกับอัตราส่วนความนำ



รูปที่ 20ข เปรียบเทียบผลการทดสอบแบตเตอรี่กับขอบเขตทั้งหมด



รูปที่ 20ค เปรียบเทียบผลการทดสอบแบตเตอรี่กับขอบเขตด้านต่ำ

รูปที่ 20 เปรียบเทียบผลการทดสอบแบตเตอรี่กับผลการคำนวณที่ได้จากอิเล็กโตรไลท์และแผ่นธาตุ

จากรูปที่ 20 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบส่วนใหญ่อยู่ในขอบเขตที่ได้จากการคำนวณ อันเป็นการสนับสนุนการวิเคราะห์ที่ผ่านมาว่ามีความถูกต้องเพียงพอที่จะใช้อธิบายถึงขอบเขตความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความจุกับอัตราส่วนความนำของแบตเตอรี่ได้ โดยเฉพาะเส้นขอบเขตล่างซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงมีความสอดคล้องอย่างดีกับผลการทดสอบซึ่งเป็นการสนับสนุนสมมติฐานสำหรับการ dry-out

เป็นที่น่าสังเกตุว่าที่ค่าอัตราส่วนความนำต่ำกว่า 60% ความจุกับความนำค่อนข้างมีลักษณะเป็นเชิงเส้นและอยู่ใกล้กับบริเวณเส้นขอบเขตล่าง (รูปที่ 20ค) ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าแบตเตอรี่มีลักษณะการเสื่อมแบบ dry-out

จากผลการทดสอบมีแบตเตอรี่จำนวน 41 ลูก ที่มีค่าอัตราส่วนความนำต่ำกว่า 60% โดยทั้งหมดมีความจุต่ำกว่า 100% ซึ่งเป็นการยืนยันถึงข้อสังเกตุที่กล่าวว่า"ช่วงความนำ $\frac{G_d}{G_n} < 60\%$ จะให้อัตราส่วนความจุน้อยกว่า 100%"

จากผลการทดสอบมีแบตเตอรี่จำนวน 41 ลูก ที่มีค่าอัตราส่วนความนำต่ำกว่า 60% ในจำนวนนี้มีแบตเตอรี่ที่มีความจุต่ำกว่า 80% จำนวน 40 ลูก และมี 1 ลูกที่มีความจุ 83% ดังนั้นเมื่อคิดอัตราส่วนแบตเตอรี่ที่มีความจุต่ำกว่า 80% ต่อแบตเตอรี่ที่มีค่าอัตราส่วนความนำต่ำกว่า 60% จะได้ 97.5% แสดงว่า แบตเตอรี่ที่มีความนำต่ำกว่า 60% มีโอกาสสูงมากที่จะมีความจุต่ำกว่า 80%

9) สรุป

เอกสารนี้ได้ให้ภาพรวมของความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับความนำ โดยพิจารณาว่าการเปลี่ยนแปลงในอิเล็กโตรไลท์เป็นสาเหตุให้ความนำและความจุของแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงค่าความนำทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงล้วนแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงภายในแบตเตอรี่ เมื่ออัตราส่วนความนำต่ำกว่า 60 % ความจุแบตเตอรี่จะต่ำกว่า 100%และมีโอกาสสูงที่จะมีความจุต่ำกว่า 80%

10) การศึกษาต่อไป

ทำการศึกษาวิเคราะห์ในรายละเอียดของความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับความนำในกรณีการ dry-out ซึ่งมีความสำคัญในการประเมินถึงสุขภาพของแบตเตอรี่ที่มีการใช้งานแบบ stand-by

11) รายการอ้างอิง

Bode.Hans, “LEAD-ACID BATTERIES’ translated by ‘Brodd.R.J, Kordesch.K.V’ John Wiley&Sons Inc,1977

ภาคผนวก ก

แรงดันเปิดวงจร (OCV) ของแบตเตอรี่สัมพันธ์กับความเข้มข้นเป็นโมแลลิตีดังนี้ (BODE)

$$OCV = 1.9228+0.147519\times\log(m)+0.063552\times\log(m)^2+0.073772\times\log(m)^3+0.033612\times\log(m)^4 \quad (V)$$

โดยที่ OCV คือแรงดันเปิดวงจร (V)

m คือความเข้มข้นเป็นโมแลลิตี (mol/kg)

ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นH_2SO_4 กับ ความหนาแน่นและความนำจำเพาะ แสดงในตารางที่ ก1 (BODE)

ตารางที่ ก1 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นH_2SO_4 กับ ความหนาแน่นและความนำจำเพาะ (BODE)

Mass Percent 100w2	Density at 25 °C (kg/liter)	Molality (mol/kg)	Molarity (mol/liter)	Specific Conductivity 100g ($\Omega^{-1}m^{-1}$)	OCV (V)
3.929	1.0229	0.417	0.4097	0.1772	1.873
7	1.0434	0.767	0.7447	0.3081	1.907
10	1.064	1.133	1.085	0.4261	1.931
14.56	1.0962	1.738	1.628	0.5859	1.963
19.8	1.1351	2.517	2.291	0.7169	1.998
25.31	1.1774	3.455	3.038	0.7983	2.035
29.47	1.2107	4.26	3.637	0.8253	2.064
34.28	1.2503	5.318	4.37	0.8187	2.101
39.1	1.2913	6.546	5.148	0.7812	2.140
43.94	1.334	7.992	5.977	0.7144	2.184
48.71	1.3787	9.683	6.846	0.6399	2.233
53.48	1.4258	11.721	7.775	0.5552	2.287
58.35	1.4762	14.284	8.782	0.4709	2.351
63.1	1.5278	17.435	9.83	0.38	2.425
67.54	1.5776	21.215	10.86	0.2968	2.507
72.28	1.6325	26.586	12.03	0.223	2.614
77.05	1.6885	34.25	13.27	0.1647	2.752
81.87	1.7423	46.042	14.54	0.1297	2.940
85.93	1.781	62.27	15.6	0.1235	3.167

สำหรับความสัมพันธ์ของความเข้มข้นเป็นโมแลลลิตี กับ ความหนาแน่นและความนำจำเพาะที่ค่าอื่นๆ ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธีการถดถอยแบบพหุนามอันดับ 6 โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ ก1 ดังนี้

ความหนาแน่น D ทำการประมาณค่าในช่วง m = 0.417 – 62.27 mol/kg

$$D = (-2.184886341583983\times10^{-10})m^6 + (4.19594138222726510^{-8})m^5 + (-3.217159505354583\times10^{-6})m^4 + (1.307545238386978\times10^{-4})m^3 + (-3.302033991408597\times10^{-3})m^2 + (6.166427905755630\times10^{-2})m + 0.9982395865280731$$

ความนำจำเพาะ g ทำการประมาณค่าในช่วง m = 0.417 – 14.284 mol/kg

$$g = (2.606598689207209\times10^{-5})m^6 + (-1.459596918595719\times10^{-4})m^5 + (-3.257011128765803\times10^{-2})m^4 + (0.9187392238874739)m^3 + (-10.39133136887367)m^2 + (49.88066455045159)m - 1.542162252645772$$

ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นเป็นโมแลลลิตี กับ ความหนาแน่นและความนำจำเพาะที่ได้จากการประมาณค่าแสดงในตารางที่ ก2

ตารางที่ ก2 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้น กับ ความหนาแน่นและความนำจำเพาะที่ได้จากการประมาณค่า

Molality (mol/kg)	Density at 25 °C (kg/liter)	Specific Conductivity g ($\Omega^{-1}m^{-1}$)	OCV (V)
0.4	1.0224	16.81	1.870
0.5	1.0283	20.91	1.882
0.6	1.0341	24.84	1.892
0.7	1.0398	28.59	1.901
0.8	1.0455	32.17	1.909
0.9	1.0512	35.58	1.916
1.0	1.0567	38.83	1.923
1.06	1.0600	40.71	1.927
1.1	1.0622	41.93	1.929
1.2	1.0677	44.87	1.935
1.3	1.0731	47.67	1.941
1.4	1.0784	50.32	1.946
1.5	1.0837	52.83	1.951
1.6	1.0890	55.21	1.956
1.7	1.0941	57.46	1.961
1.8	1.0993	59.59	1.966
1.815	1.1000	59.90	1.967
1.9	1.1043	61.59	1.971
2.0	1.1094	63.48	1.975
2.1	1.1143	65.25	1.980
2.2	1.1192	66.92	1.984
2.3	1.1241	68.47	1.989
2.4	1.1289	69.93	1.993
2.5	1.1337	71.29	1.997
2.6	1.1384	72.55	2.001
2.7	1.1431	73.72	2.005
2.8	1.1477	74.81	2.009
2.9	1.1523	75.81	2.013
3.0	1.1568	76.73	2.017
3.1	1.1613	77.57	2.021
3.2	1.1657	78.34	2.025
3.3	1.1701	79.03	2.029
3.4	1.1745	79.66	2.033
3.5	1.1788	80.22	2.037
3.6	1.1830	80.72	2.040
3.7	1.1872	81.16	2.044
3.8	1.1914	81.54	2.048
3.9	1.1956	81.86	2.052
4.0	1.1997	82.14	2.055

Molality (mol/kg)	Density at 25 °C (kg/liter)	Specific Conductivity g ($\Omega^{-1}m^{-1}$)	OCV (V)
4.1	1.2037	82.36	2.059
4.2	1.2077	82.54	2.062
4.3	1.2117	82.67	2.066
4.4	1.2156	82.76	2.069
4.5	1.2195	82.81	2.073
4.6	1.2234	82.82	2.076
4.7	1.2272	82.79	2.080
4.8	1.2310	82.73	2.083
4.9	1.2348	82.64	2.087
5.0	1.2385	82.52	2.090
5.1	1.2422	82.36	2.094
5.2	1.2458	82.18	2.097
5.3	1.2494	81.98	2.100
5.317	1.2500	81.94	2.101
5.4	1.2530	81.75	2.104
5.5	1.2565	81.50	2.107
5.6	1.2600	81.23	2.110
5.7	1.2635	80.94	2.113
5.8	1.2670	80.63	2.117
5.9	1.2704	80.31	2.120
6.0	1.2737	79.97	2.123
6.1	1.2771	79.62	2.126
6.2	1.2804	79.25	2.130
6.3	1.2837	78.88	2.133
6.4	1.2870	78.49	2.136
6.5	1.2902	78.09	2.139
6.6	1.2934	77.68	2.142
6.7	1.2966	77.27	2.145
6.8	1.2997	76.85	2.148
6.81	1.3000	76.81	2.149
6.9	1.3028	76.42	2.151
7.0	1.3059	75.99	2.155
7.1	1.3090	75.55	2.158
7.2	1.3120	75.11	2.161
7.3	1.3150	74.66	2.164
7.4	1.3180	74.22	2.167
7.5	1.3209	73.77	2.170
7.6	1.3238	73.31	2.173
7.7	1.3268	72.86	2.176

Molality (mol/kg)	Density at 25 °C (kg/liter)	Specific Conductivity g ($\Omega^{-1}m^{-1}$)	OCV (V)
7.8	1.3296	72.41	2.179
7.9	1.3325	71.95	2.182
8.0	1.3353	71.50	2.185
8.1	1.3381	71.04	2.187
8.2	1.3409	70.59	2.190
8.3	1.3437	70.13	2.193
8.4	1.3464	69.68	2.196
8.5	1.3491	69.23	2.199
8.6	1.3518	68.78	2.202
8.7	1.3545	68.33	2.205
8.8	1.3571	67.88	2.208
8.9	1.3597	67.43	2.211
9.0	1.3623	66.99	2.213
9.1	1.3649	66.55	2.216
9.2	1.3675	66.10	2.219
9.3	1.3700	65.66	2.222
9.4	1.3725	65.23	2.225
9.5	1.3750	64.79	2.227
9.6	1.3775	64.36	2.230
9.7	1.3800	63.93	2.233
9.8	1.3824	63.50	2.236
9.9	1.3848	63.07	2.239
10.0	1.3872	62.64	2.241
10.1	1.3896	62.21	2.244
10.2	1.3920	61.79	2.247
10.3	1.3943	61.37	2.249
10.4	1.3967	60.95	2.252
10.5	1.3990	60.53	2.255
10.6	1.4013	60.11	2.258
10.7	1.4036	59.69	2.260
10.8	1.4058	59.28	2.263
10.9	1.4081	58.86	2.266
11.0	1.4103	58.45	2.268
11.1	1.4125	58.04	2.271
11.2	1.4147	57.62	2.273
11.3	1.4169	57.22	2.276
11.4	1.4191	56.81	2.279
11.5	1.4212	56.40	2.281
11.6	1.4233	56.00	2.284
11.7	1.4255	55.59	2.287

Molality (mol/kg)	Density at 25 °C (kg/liter)	Specific Conductivity g ($\Omega^{-1}m^{-1}$)	OCV (V)
11.8	1.4276	55.19	2.289
11.9	1.4297	54.79	2.292
12.0	1.4317	54.39	2.294
12.1	1.4338	54.00	2.297
12.2	1.4358	53.61	2.299
12.3	1.4379	53.22	2.302
12.4	1.4399	52.84	2.305
12.5	1.4419	52.45	2.307
12.6	1.4439	52.08	2.310
12.7	1.4459	51.71	2.312
12.8	1.4478	51.34	2.315
12.9	1.4498	50.98	2.317
13.0	1.4517	50.63	2.320
13.1	1.4537	50.28	2.322
13.2	1.4556	49.95	2.325
13.3	1.4575	49.62	2.327
13.4	1.4594	49.30	2.330
13.5	1.4613	48.99	2.332
13.6	1.4631	48.70	2.335
13.7	1.4650	48.41	2.337
13.8	1.4668	48.15	2.340
13.9	1.4686	47.89	2.342
14.0	1.4705	47.66	2.344
14.1	1.4723	47.44	2.347
14.2	1.4741	47.24	2.349
14.3	1.4759	47.06	2.352
14.4	1.4776	46.91	2.354
14.5	1.4794	46.78	2.357
14.6	1.4811	46.68	2.359
14.7	1.4829	46.60	2.361

ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณน้ำหนักของแผ่นธาตุและน้ำกรดในแบตเตอรี่

จากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

$$PbO_2 + 2H_2SO_4 + Pb + 2e^- \leftrightarrows 2PbSO_4 + 2H_2O$$

จากปฏิกิริยาข้างต้น จะได้ว่า 1 โมลของ PbO_2 และ Pb จะสร้างประจุไฟฟ้าจำนวน 2 โมลอิเล็กตรอน ($2e^-$)

จาก 1 โมลอิเล็กตรอน = 1F (Faraday) = 96,485.3415 C (Coulomb)

$$1F = \frac{96,485.3415}{3,600} = 26.802 \text{ Ah}$$

ดังนั้น 1 โมลของ PbO_2 และ Pb จะได้ประจุไฟฟ้า 2x26.802 = 53.604 Ah

มวลอะตอมของธาตุ

Pb = 207.2 amu

O = 15.9994 amu

H = 1.00794 amu

S = 32.066 amu

1 โมลของ PbO_2 มีน้ำหนักเท่ากับ 207.2+(2x15.9994) = 239.1988 g

1 โมลของ Pb มีน้ำหนักเท่ากับ 207.2 g

1 โมลของ H_2SO_4 มีน้ำหนักเท่ากับ (2x1.00794)+32.066+(4x15.9994) = 98.07948 g

1 โมลของ $PbSO_4$ มีน้ำหนักเท่ากับ 207.2+32.066+(4x15.9994) = 303.2636 g

1 โมลของ H_2O มีน้ำหนักเท่ากับ (2x1.00794)+15.994 = 18.00988 g

เพราะฉะนั้นจะสามารถคำนวณหาน้ำหนักของสารต่างๆ ต่อ Ah ได้ดังนี้

น้ำหนักของ PbO_2 ต่อ Ah เท่ากับ $\frac{239.1988}{53.604}$ = 4.462 g/Ah

น้ำหนักของ Pb ต่อ Ah เท่ากับ $\frac{207.2}{53.604}$ = 3.865 g/Ah

น้ำหนักของ H_2SO_4 ต่อ Ah เท่ากับ $\frac{2\times98.07948}{53.604}$ = 3.659 g/Ah

น้ำหนักของ $PbSO_4$ ต่อ Ah เท่ากับ $\frac{2\times303.2636}{53.604}$ = 11.315 g/Ah

น้ำหนักของ H_2O ต่อ Ah เท่ากับ $\frac{2\times18.00988}{53.604}$ = 0.672 g/Ah

} Theoretical value

<u>แผ่นธาตุ</u>

ในทางปฏิบัติ PbO_2 และ Pb ในแบตเตอรี่ไม่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้ทั้งหมดทั้งนี้เนื่องมาจาก

1) เมื่อแบตเตอรี่คายประจุแล้วจะเกิด $PbSO_4$ ขึ้น ซึ่งตัว $PbSO_4$ นี้เป็นฉนวน ทำให้แบตเตอรี่มีความต้านทานภายในสูงขึ้นจนทำให้แรงดันแบตเตอรี่ต่ำกว่า Cut-off Voltage
2) $PbSO_4$ ที่เกิดขึ้นจะบล็อกน้ำกรดไม่ให้แพร่เข้าสู่ Pore ของแผ่นธาตุได้ ส่งผลให้ PbO_2 และ Pb ที่เหลืออยู่ไม่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้

สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์(Utilization Coefficient) ของแผ่นธาตุดังนี้

$$\mu = \frac{\text{น้ำหนักสารที่ทำปฏิกิริยา}}{\text{น้ำหนักของสารตั้งต้น}}$$

สำหรับแบตเตอรี่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีสัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์ของแผ่นธาตุบวก

$$\mu_{PbO_2} \approx 40\%$$

และสัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์ของแผ่นธาตุลบ

$$\mu_{Pb} \approx 45\%$$

เพราะฉะนั้นจึงสามารถคำนวณน้ำหนักของ PbO_2 และ Pb ในแบตเตอรี่ได้ดังนี้

น้ำหนักของ PbO_2 ที่ต้องใช้ในแบตเตอรี่ $= \frac{4.462}{0.40} = 11.155$ g/Ah

น้ำหนักของ Pb ที่ต้องใช้ในแบตเตอรี่ $= \frac{3.865}{0.45} = 8.589$ g/Ah

<u>น้ำกรด</u>

จากสมการเคมี เมื่อแบตเตอรี่คายประจุจะใช้ H_2SO_4 จำนวน 2 โมล เกิด H_2O จำนวน 2 โมล และได้ประจุไฟฟ้า 2F (1F = 26.802Ah) ดังนั้นจึงสามารถคำนวณน้ำหนักและปริมาตรของน้ำกรดได้ดังนี้

กำหนดให้

$w_{1,kg}$ คือ น้ำหนักของ H_2SO_4 จำนวน 1 โมล = 0.09807948 kg

$w_{2,kg}$ คือ น้ำหนักของ H_2O จำนวน 1 โมล = 0.01800988 kg

m_i คือ โมแลลลิตีของสารละลายน้ำกรดเริ่มต้น (mol/kg)

m_f คือ โมแลลลิตีของสารละลายน้ำกรดหลังทำปฏิกิริยา (mol/kg)

B_i คือ น้ำหนักของสารละลายน้ำกรดเริ่มต้น (kg)

V_i คือ ปริมาตรของสารละลายน้ำกรดเริ่มต้น (liter)

γ คือ จำนวนโมลของประจุไฟฟ้าหรือสารเคมีที่เปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาเคมี

<u>คำนวณน้ำหนัก H_2SO_4 และ H_2O เริ่มต้น</u>

เริ่มต้นสารละลายน้ำกรดมีความเข้มข้น m_i นั่นคือมี

น้ำหนักของ H_2SO_4 ต่อน้ำหนักของ H_2O 1 kg เท่ากับ $m_i \times w_{1,kg}$ (kg)

น้ำหนักรวมของสารละลายต่อน้ำหนักของ H_2O 1 kg เท่ากับ $1 \times m_i \times w_{1,kg} + 1kg$ (kg)

เพราะฉะนั้น

น้ำหนักของ H_2SO_4 ต่อน้ำหนักรวมของสารละลายเท่ากับ $\dfrac{m_i \times w_{1,kg}}{m_i \times w_{1,kg} + 1}$

น้ำหนักของ H_2O ต่อน้ำหนักรวมของสารละลายเท่ากับ $\dfrac{1}{m_i \times w_{1,kg} + 1}$

ถ้าเริ่มต้นสารละลายมีน้ำหนักรวม B_i (kg) จะมี

น้ำหนักของ H_2SO_4 เท่ากับ $\dfrac{B_i \times m_i \times w_{1,kg}}{m_i \times w_{1,kg} + 1}$ (kg)

น้ำหนักของ H_2O เท่ากับ $\dfrac{B_i}{m_i \times w_{1,kg} + 1}$ (kg)

<u>คำนวณน้ำหนัก H_2SO_4 และ H_2O หลังทำปฏิกิริยา</u>

สมมุติหลังทำปฏิกิริยาได้ประจุไฟฟ้าจำนวน γ (F) จะต้องใช้ H_2SO_4 จำนวน γ โมล และเกิด H_2O จำนวน γ โมล

เพราะฉะนั้นจะเหลือน้ำหนักของ H_2SO_4 ในสารละลายเท่ากับ $\frac{B_i m_i w_{1,kg}}{m_i w_{1,kg}+1} - \gamma w_{1,kg}$ (kg)

และมีน้ำหนักของ H_2O เท่ากับ $\frac{B_i}{m_i w_{1,kg}+1} + \gamma w_{2,kg}$ (kg)

สามารถคำนวณโมแลลลิตีของสารละลายหลังทำปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$m = \frac{\text{น้ำหนัก } H_2SO_4 / \ w_{1,kg}}{\text{น้ำหนัก } H_2O}$$

$$m = \frac{\left[\frac{B_i m_i w_{1,kg}}{m_i w_{1,kg}+1} - \gamma w_{1,kg}\right] / w_{1,kg}}{\left[\frac{B_i}{m_i w_{1,kg}+1} + \gamma w_{2,kg}\right]}$$

$$m = \frac{\left[\frac{B_i m_i}{m_i w_{1,kg}+1} - \gamma\right]}{\left[\frac{B_i}{m_i w_{1,kg}+1} + \gamma w_{2,kg}\right]}$$

สมมุติหลังจากปฏิกิริยาสิ้นสุดแล้ว ความเข้มข้นของสารละลายเท่ากับ m_f

และเกิดประจุไฟฟ้าจำนวน γ_f

แทนในสมการข้างต้นแล้วจัดรูปจะได้น้ำหนักของสารละลายเริ่มต้น

$$B_i = \frac{\gamma_f (1+m_i w_{1,kg})(1+m_f w_{2,kg})}{m_i - m_f} \quad \text{(kg)}$$

จากประจุไฟฟ้าจำนวน $\gamma_f = \frac{Ah_f}{26.802}$

โดยที่ Ah_f คือประจุไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมาทั้งหมด (Ah) จะได้น้ำหนักของสารละลายเริ่มต้น

$$B_i = \frac{Ah_f}{26.802} \frac{(1+m_i w_{1,kg})(1+m_f w_{2,kg})}{m_i - m_f} \quad \text{(kg)}$$

เมื่อจัดรูปจะได้ น้ำหนักของสารละลายเริ่มต้นต่อความจุ 1AH

$$\frac{B_i}{Ah} = \frac{1}{26.802}\frac{(1+m_i w_{1,kg})(1+m_f w_{2,kg})}{m_i - m_f} \quad \text{(kg/Ah)}$$

สามารถคำนวณปริมาตรของสารละลายเริ่มต้น V_i ได้ดังนี้

$$V_i = \frac{B_i}{D_i}(liter) \quad ;D_i \text{ ความหนาแน่นของสารละลายเริ่มต้น}$$

<u>ตัวอย่างการคำนวณที่ 1 : แบตเตอรี่แบบ AGM</u>

แบตเตอรี่แบบ AGM ปกติจะมีความหนาแน่นเริ่มต้นเท่ากับ 1.3 จากตารางที่ ก2 จะได้

$m_i = 6.81 (D = 1.300)$

และหลังจากแบตเตอรี่คายประจุหมดแล้วจะมีความหนาแน่นเท่ากับ 1.06

(โดยทั่วไปความหนาแน่นต่ำสุดไม่ควรน้อยกว่า 1.06) จากตารางที่ ก2 จะได้

$m_f = 1.06 (D = 1.06)$

จะสามารถคำนวณน้ำหนักของน้ำกรดเริ่มต้นต่อ 1 Ah ได้

$$B_i = \frac{1}{26.802}\frac{(1+(6.81\times 0.09807948))(1+(1.06\times 0.01800988))}{6.81-1.06} kg$$

$$B_i = 0.011029\ kg$$

หรือต้องมีน้ำกรด 0.011029 kg / Ah

คำนวณปริมาตรน้ำกรดเริ่มต้น

$$V_i = \frac{0.011029}{1.300} liter$$

$$V_i = 0.008484\ liter$$

หรือต้องมีน้ำกรด 0.008484 ลิตร / AH

สรุป

สำหรับแบตเตอรี่แบบ AGM ต้องใช้น้ำกรดความถ่วงจำเพาะ 1.300 จำนวน 0.011029 kg/AH หรือ 0.008484 liter/AH

ตัวอย่างการคำนวณที่ 2 : แบตเตอรี่แบบ Gelled

แบตเตอรี่แบบ Gelled ที่มีความหนาแน่นเริ่มต้นเท่ากับ 1.28 จากตารางที่ ก2 จะได้

$m_i = 6.2\ (D = 1.2804)$

และหลังจากแบตเตอรี่คายประจุหมดแล้วจะมีความหนาแน่นเท่ากับ 1.06

(โดยทั่วไปความหนาแน่นต่ำสุดไม่ควรน้อยกว่า 1.06) จากตารางที่ ก2 จะได้

$m_i = 1.06\ (D = 1.06)$

จะสามารถคำนวณน้ำหนักของน้ำกรดเริ่มต้นต่อ 1 Ah ได้

$$B_i = \frac{1}{26.802}\frac{(1+(6.2\times 0.09807948))(1+(1.06\times 0.01800988))}{6.2-1.06} kg$$

$$B_i = 0.01190\ kg$$

หรือต้องมีน้ำกรด 0.01190 kg / Ah

คำนวณปริมาตรน้ำกรดเริ่มต้น

$$V_i = \frac{0.01190}{1.2804} liter$$

$$V_i = 0.009294\ liter$$

หรือต้องมีน้ำกรด 0.009294 ลิตร / AH

สรุป

สำหรับแบตเตอรี่แบบ Gelled ต้องใช้น้ำกรดความถ่วงจำเพาะ 1.28 จำนวน 0.0119 kg/AH หรือ 0.009294 liter/AH