

## บทที่ 8

### ความหนาแน่น, ชั้นทะเลสาบ และการจัดจำแนกทะเลสาบ

(Density, layering, and lake classification)

#### Temperature stratification

#### Lake region, and water density

ทะเลสาบลึกปานกลาง ที่ไม่มีกระแสลมแรงจัด จะมีอุณหภูมิแตกต่างกัน เนื่องจากจำนวนแสงที่ส่องทะลุผ่าน (Fig. 8-1) เมื่อลมพัดผ่านผิวชั้นบนของน้ำ ทำให้ความร้อนกระจุกตัวสะสมผ่านลงสู่เบื้องล่าง ผลของความแตกต่างนี้ดูได้จาก Fig. 8-2

**Typical Direct stratification** เป็นการแบ่งแยกชั้นของน้ำ, น้ำเย็นจะอยู่ข้างล่าง ส่วนน้ำอุ่นจะอยู่ผิวบน ได้แบ่งทะเลสาบออกเป็น 3 เขต (lake region)

1. **Upper lake (epilimnion)** เป็นเขตอบอุ่นตอนบน มีการเคลื่อนไหวของผิวน้ำ โดยกระแสลม ทำให้มีผลต่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมากหรือน้อย

2. **Middle lake (metalimnion หรือ changing lake** ตั้งโดย Bronsted และ Wesenberg-Lund (1911); thermocline (temperature gradient) ตั้งโดย Birge (1897); mesolimnion, discontinuity layer) เป็นเขตที่อุณหภูมิค่อนข้างคงที่มาก ซึ่งอุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วต่อความลึกที่ลึกลงไป เป็นเขตที่มีกระแสคลื่น, การผสมของน้ำเป็นเขตติดต่อเขตบนและล่าง Birge ว่าเขตนี้ อุณหภูมิจะลดลงอย่างน้อย  $1^{\circ}\text{C}$  ทุก ๆ ความลึกที่ลึกลงไป 1.0 เมตร

3. **Lower lake (hypolimnion)** เป็นเขตที่ถัดลงมาจาก middle lake, เขตหนาวกว่าที่อยู่ตอนล่าง มีน้ำหนักกว่า, กระแสลมพัดมีผลเล็กน้อยต่อการเคลื่อนไหวของน้ำ, อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วคงที่

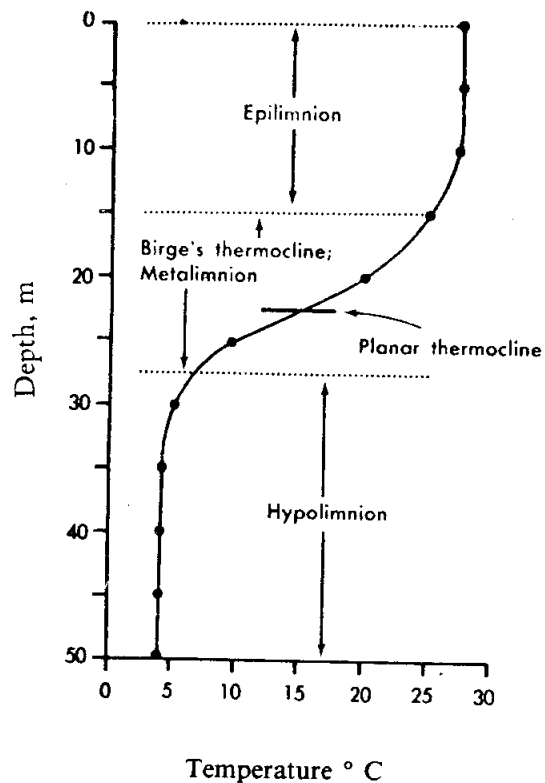
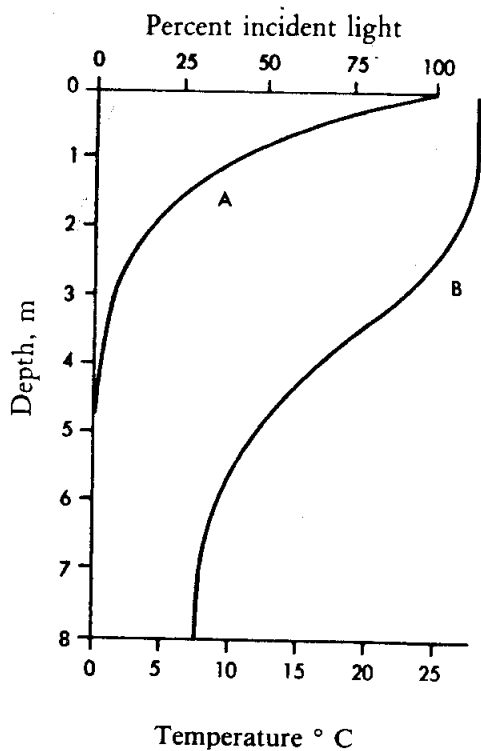


Fig. 8-1. Comparison of the vertical daytime light curve (A) and the temperature curve (B). Tom Wallace Lake, Kentucky; 25 June 1952.

Fig. 8-2. Vertical temperature profile showing direct stratification and the lake regions defined by it.

การแบ่งแยกทะเลสาบนี้ ทำให้ upper lake ที่มี primary productivity ปรากฏขึ้น อินทรีย์วัตถุถูกสังเคราะห์ใน trophogenic epilimnion, ส่วนมากมักจมลงสู่ tropholytic hypolimnion แล้วถูกสลายเป็นแร่ธาตุโดย แบคทีเรีย

คำว่า thermocline หมายถึง temperature gradients, คำนี้ไม่ค่อยเหมาะสม จึงมีคำใหม่คือ metalimnion ตัวอย่างเช่น มวลของน้ำบางที่ป้องกันอากาศที่จะซึมเข้าสู่ผิวน้ำ จะมีกราฟอุณหภูมิในฤดูร้อน (summer temperature curve) คล้ายกับ exponential light absorption profile ในทะเลสาบพอถึงฤดูร้อนอุณหภูมิจะสูงขึ้นหรือลดลงที่ผิวทะเลสาบ, ชั้น epilimnion ยากที่จะแบ่งเนื่องจากดินหรือหายไป และ metalimnion จะอยู่ชั้นบนสุด ดังนั้นคำว่า thermocline เป็นประโยชน์มากที่จะอธิบาย บริเวณที่อุณหภูมิลดลงเริ่มที่ผิวของทะเลสาบ

### ความแตกต่างของอุณหภูมิมีความสำคัญต่อความหนาแน่น (Table 8-1)

ภายใต้ความกดดันปกติ น้ำจะหนักที่สุดที่ 4 °C มีความหนาแน่น 1.0 โมเลกุลของน้ำที่ผิดปกติมากกว่า เนื่องจากมันเย็นต่ำกว่า 4 °C มันจะลอยมากกว่าที่จะจมอยู่ในน้ำแข็ง ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 4 °C ความหนาแน่นจะลดลง Direct stratification (Fig. 8-1, B, 8-2 และ 8-3) แสดงให้เห็นถึงน้ำอุ่นจะลอยตัวอยู่ข้างบนกว่าน้ำเย็นที่อยู่ด้านล่าง, โดยกลับกันธรรมชาติของ stratification ใต้น้ำแข็งที่ปกคลุม น้ำแข็งที่ 0 °C ลอยอยู่บนน้ำอุ่นที่ 4 °C ที่ส่วนลึกของกันพื้นทะเลสาบ

Isothermal (homoio thermal) มวลของน้ำมีอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง temperature curve จะอยู่ในแนวตั้งตรง และตามทฤษฎีความหนาแน่นควรเหมือนกันตลอด

Table 8-1. Some temperature-density relationships of pure water at one atmosphere pressure and with density 1.0 at 4° C

C	Density change $\times 10^7$	Ratio
0-1	<b>+ 588</b>	7.25
1-2	412	5.08
2-3	<b>243</b>	3.00
3-4	<b>78</b>	<b>0.96</b>
4-5	<b>81</b>	<b>1.00</b>
5-6	<b>238</b>	2.93
6-7	<b>388</b>	4.79
7-8	533	<b>6.58</b>
8-9	674	8.32
9-10	<b>811</b>	10.01
10-11	949	11.71
11-12	<b>1081</b>	13.34
12-13	1207	14.90
13-14	<b>1328</b>	<b>16.39</b>
14-15	1447	17.66
15-16	<b>1564</b>	19.30
16-17	1679	20.73
17-18	1790	22.00
18-19	<b>1901</b>	23.46
19-20	<b>2008</b>	24.79
20-21	<b>2113</b>	<b>26.08</b>
21-22	2217	27.37
22-23	2319	28.62
23-24	<b>2418</b>	29.85
24-25	2517	31.07
25-26	2611	32.23
26-27	2707	33.41
27-28	2793	34.54
28-29	<b>2888</b>	35.65
29-30	2979	36.77

★ The ratio above is:

$$\frac{\text{Density change between two adjacent temperatures}}{\text{Density change between } 4^\circ \text{ and } 5^\circ \text{ C}}$$

Thus, between 24° and 25° the density change is  $2517 \times 10^{-7}$ ; between 4° and 5° it is  $81 \times 10^{-7}$ . The ratio is  $25 \frac{17}{81} = 3.107$ . This means that the change between 24° is more than 31 times greater than the density change between 4° and 5°. By summation, the density change between 12° and 16° is  $5546 \times 10^{-7}$

### Factor modifying of water and temperature gradients

**Temperature** คนเราส่วนใหญ่ศึกษาอุณหภูมิในทะเลสาบ, บ่อ ส่วนมากเกี่ยวกับน้ำอ่อน ในการหาความหนาแน่นของน้ำคิดจากน้ำที่บริสุทธิ์ และอุณหภูมิเป็นปัจจัยต่อความหนาแน่น Table 8-1 แสดงให้เห็นถึงภายใต้สภาวะเหล่านี้ ความหนาแน่นจะเปลี่ยนระหว่าง 24 และ 25 C มากกว่า 31 เท่า ใหญ่กว่าการเปลี่ยนระหว่าง 4 และ 5 C จากจุดนี้ถูกเน้นหนักจาก Fig. 8-3 ว่าความหนาแน่นที่สูงขึ้น หรือลดลงโดยชั้นของอุณหภูมิในทะเลสาบน้ำเย็นถูกเปรียบเทียบกับในทะเลสาบน้ำอุ่น

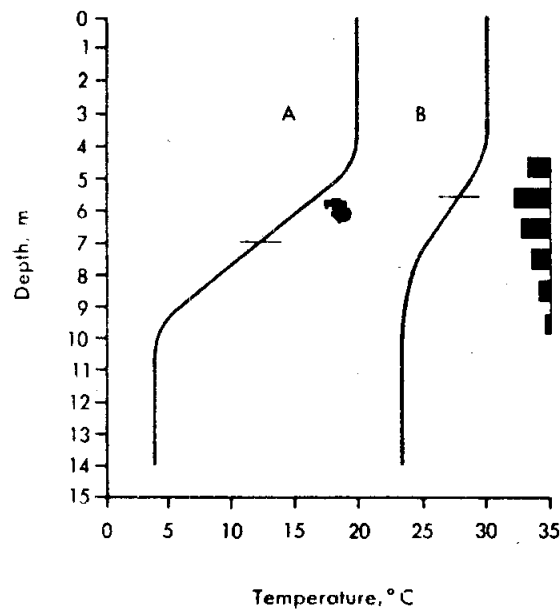


Fig. 8-3. Comparison of the temperature profiles of a cold lake (A) and a warmer lake (B) having identical density gradients caused by temperature. Density changes shown by histograms at right. Horizontal lines in curves represent planar thermoclines based on maximum temperature change.

**Pressure** ความดันต่ำกว่าอุณหภูมิของความหนาแน่นมาก ดังนั้นในทะเลสาบที่ลึกมาก ชั้นต่ำสุดจะมีอุณหภูมิน้ำต่ำกว่า 4.0 C และต่ำกว่า 3.94 C คือน้ำที่ระดับน้ำทะเล 1 บรรณอากาศ ประมาณเท่ากับน้ำที่รวมตัวกันเป็นแท่ง  $1,000 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}^2$ ,  $1 \text{ kg/cm}^2$  ที่จริงมัน

เป็น 1.032 kg และปรากฏว่าทุกความลึก 10 เมตรลึกลงไปจะเท่ากับความดันของบรรยากาศอื่น ๆ อุณหภูมิเฉลี่ยของความหนาแน่นมากที่สุดต่ำกว่า  $0.1^{\circ}\text{C}$  ต่อ 100 เมตร ส่วนมากอุณหภูมิของความหนาแน่นมากที่สุดต่ำกว่า 500 เมตร ของน้ำที่  $3.39^{\circ}\text{C}$  และต่ำกว่า 1,000 เมตรของน้ำที่  $2.91^{\circ}\text{C}$

#### Solutes (salinity)

อุณหภูมิของความหนาแน่นมากที่สุดขึ้นอยู่กับความเค็มสูง, อุณหภูมิชั้น hypolimnion ต่ำกว่า  $0^{\circ}\text{C}$  ตัวอย่างเช่น Manito lake, จุดแข็งตัวต่ำกว่า  $-1.1^{\circ}\text{C}$  และความหนาแน่นมากที่สุดที่  $-0.3^{\circ}\text{C}$  ในช่วงฤดูร้อน เมื่อน้ำแข็งที่ปกคลุมอยู่ละลายตัว เมื่ออุณหภูมิลดลงอย่างผิดปกติ นำเอาความเย็น, ความเค็มเข้าสู่ทะเลสาบ ในฤดูใบไม้ผลิ ลมได้พัดกระแสน้ำเกิดการหมุนเวียน ทำให้อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงต่ำกว่าจุดแข็งตัวของน้ำ และความร้อนไม่สูงเพิ่มขึ้น ตลอดที่ชั้นของผิวน้ำอุ่น, เพื่อที่จะสร้างการแบ่งแยกชั้น ซึ่งน้ำเย็นจะอยู่ในระดับล่าง

ความต่างจำเพาะเพิ่มขึ้นจากน้ำที่เริ่มมีความเค็ม ในทะเลสาบที่มีชั้นความเค็ม, อุณหภูมิปกติ เริ่มทำให้ความหนาแน่นมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกัน และกลับกัน, น้ำอุ่นจะอยู่ต่ำกว่าน้ำเย็น ถ้ามีเกลือมากพอ Fig. 8-4 แสดงถึง temperature curve กลับกันโดยชั้นที่มีความเค็ม ความเค็มของบ่อต้นเข้มน้ำโดยน้ำถูกระเหยกลายเป็นไอ กลับอยู่ชั้นบน เมื่อชั้นที่เจือจางกว่าจากฝนตกจะไหลออก อุณหภูมิสูงในส่วนที่ลึกกว่าโดยการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์เข้าสู่ชั้นที่อยู่บนกว่า ความเค็มของกันพื้นน้ำมีความร้อนสะสมมากขึ้น ขณะที่ชั้นบนกว่าเจือจาง ได้ช่วยลดการแผ่รังสีและป้องกันการระเหยจากความร้อน ความหนาแน่นต่างกันได้ป้องกันทุก ๆ สิ่ง แต่จะค่อย ๆ ซ้ำลงของส่วนผสมของทั้งสองชั้น

ในน้ำที่มีความเค็ม, อุณหภูมิแม้ว่าจะลดจำนวน  $0.1^{\circ}\text{C}$  ต่อ ซม. หาดพบได้ยากในชั้น metalimnion ของน้ำจืด

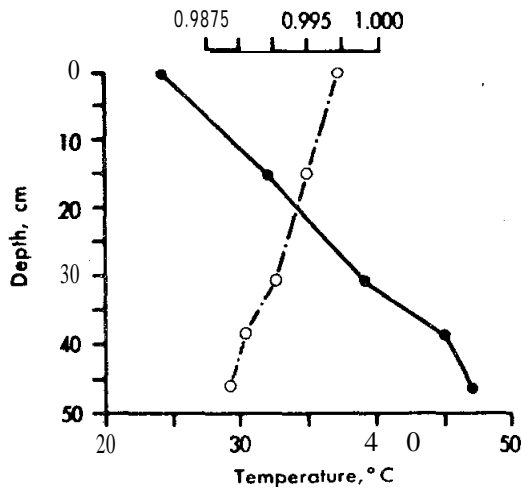


Fig. O-4. Inverse **temperature** stratification in a **saline** desert pool. Solid line indicates temperature, ° C; broken line shows density of distilled water at the same temperatures. (Modified from Cole and Minckley 1968.)

### Suspended particles (อนุภาคที่แขวนลอย)

สารไม่ต้องการสลายตัวในมวลของน้ำที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ดังนั้นอนุภาคที่แขวนลอยอยู่จึงมีผลถูกระทบ ตัวอย่างเช่น กระแสน้ำอุ่นมีโคลนไหลเข้าทะเลสาบที่มีกระแสน้ำใสสะอาด ทำให้เกิด density current ทำให้อนุภาคถูกกำจัดชั่วคราว, อนุภาคผ่านท่อน้ำที่เย็นกว่าแล้วผ่านลงสู่เบื้องล่าง จนกระทั่งถึงระดับหนึ่ง ซึ่งความหนาแน่นของมันถูกจับเข้าด้วยกัน

Particulate matter เช่น solutes (salinity) ทำให้ระดับอนุภาคสูงขึ้น ในการรวมกับความหนาแน่นบางส่วน particle ที่อยู่ชั้นบนกว่าจะดูดซึมรังสีความร้อน แตกต่างกับที่มันอยู่ในแนวตั้ง

### Stability of stratification

การแบ่งชั้นของน้ำอย่างถาวรในฤดูร้อน เนื่องจากความหนาแน่นต่างกัน มีอุณหภูมิเข้ามามีเกี่ยวข้องด้วย จะสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยเกิดจากกระบวนการกระทำของสิ่งที่มาเกี่ยวข้อง ทำให้เกิดจำนวนงานมากมาย ลมในฤดูร้อนไม่มีกำลังมากพอต่อการกระทำไม่ให้เกิดการแบ่งชั้นถาวร

S คือ จำนวนของงานที่ใช้เพื่อให้ความหนาแน่นเดียวกันตลอดทะเลสาบ โดยไม่มีส่วนอื่นเข้ามาเพิ่ม เช่น ความร้อน ถ้าความหนาแน่นเดียวกันตลอดจากผิวถึงก้นทะเลสาบ, S = 0 หมายความว่าไม่มีงานที่ต้องทำให้มันกลายเป็นเนื้อเดียวตลอด ในทะเลสาบบางแห่งในเวลาที่กำหนด มีจุดที่เป็นตัวแทนความลึกของจุดศูนย์กลาง (Center of gravity, Z<sub>g</sub>); เหนือจุดนี้ มวลน้ำเท่ากับมวลของน้ำชั้นล่าง, ในแนวตั้งมีความหนาแน่น, อุณหภูมิ, ความเค็ม, สารแขวนลอยต่างกัน, ต่ำกว่าจุดศูนย์กลาง ถ่วง จากระดับเดียวกัน เมื่อความหนาแน่นเดียวกันตลอด stability เพิ่มมากขึ้นในขณะที่จุดศูนย์กลางถ่วงลดต่ำลง งานคือแรงที่ใช้เคลื่อนที่วัตถุไปในระยะทางที่ต้องการ, จะลดลงต่อหน่วยของงานในระบบ cgs. Stability อยู่ในหน่วยของ gm - centimeter ต่อ centimeter<sup>2</sup>

$$S = \sum_{Z_0}^{Z_m} (Z - Z_{\bar{\rho}}) (\bar{f}_Z - \bar{f}) \frac{A_Z}{A_0} \Delta Z$$

A<sub>0</sub> = พ.ท.ผิวหน้า หน่วย cm<sup>2</sup>

A<sub>Z</sub> = พ.ท.ที่ความลึก Z cm

$\bar{f}$  = ความหนาแน่นสุดท้าย (เฉลี่ย) หน่วย g/cm<sup>3</sup>

$\bar{f}_Z$  = ความหนาแน่นที่ความลึก Z cm

Z <sub>$\bar{\rho}$</sub>  = ความลึกหน่วยเป็น cm. เมื่อความหนาแน่นเฉลี่ยผสม

Z<sub>m</sub> = ความลึกสูงสุดหน่วย cm

Z<sub>0</sub> = ความลึกผิวหน้า หรือ = 0 หน่วย cm

Table 8-2. Data and calculations of stability stratification in Tom Wallace Lake, Kentucky, 26 June 1954.

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
z	T <sub>z</sub>	A <sub>z</sub>	$\rho_z$		A <sub>z</sub> /Δz	$\rho_z A_z \Delta z$	$\rho_z - \bar{\rho}$	z - z <sub><math>\bar{\rho}</math></sub>	(V × VIII × IX)
cm	°C	10 <sup>4</sup> cm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>	A <sub>z</sub> /A <sub>0</sub>	10 <sup>4</sup> cm <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup> g	g/cm <sup>3</sup>	cm	g/cm <sup>2</sup>
50	27.7	2.150	0.99634	0.9188	215.0	214.21	-0.00165	-196.5	0.29789
150	26.7	1.800	0.99662	0.7692	180.0	179.39	-0.00137	- 96.5	0.10169
250	20.9	1.500	0.99804	0.6410	150.0	149.71	+ 0.0050	+ 3.5	0.00112
350	14.0	1.235	0.99927	0.5278	123.5	123.41	0.00128	103.5	0.06992
450	10.3	0.980	0.99700	0.4188	98.0	97.97	0.00171	203.5	0.14574
550	8.1	0.725	0.99987	0.3098	72.5	72.49	0.00188	303.5	0.17676
650	7.3	0.470	0.99992	0.2009	47.0	47.00	0.00193	403.5	0.15645
750	7.0	0.220	0.99993	0.0940	22.0	22.0	0.00194	503.5	0.09182
850	6.9	0.010	0.99993	0.0043	1.0	1.00	0.00194	603.5	0.00503
Totals					909.0	907.18			1.04642



$$\bar{\rho} = \frac{1}{V} \sum_{z_0}^{z_m} \rho_z A_z \Delta z = \frac{907.18}{909} = 0.99799 \text{ g/cm}^3$$

By interpolation, therefore,  $z_{\bar{\rho}} = 246.5 \text{ cm}$ .

$$S = \sum_{z_0}^{z_m} (z - z_{\bar{\rho}}) (\rho_z - \bar{\rho}) \frac{A_z}{A_0} \Delta z = 1.04642 \text{ g/cm}^2 \times 100 \text{ cm} = 104.6 \text{ g-cm/cm}^2$$

Table 8-2 แสดงถึง stability of stratification ในเวลาหนึ่ง

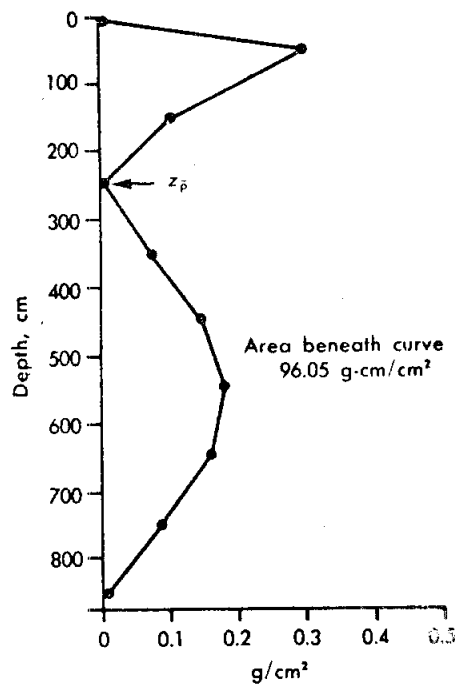


Fig. 8-5. Stability curve of Tom Wallace Lake, Kentucky, 26 June 1954. Area beneath curve represents about 96.05 g-cm/cm<sup>2</sup>

Fig. 8-5 รูปพล็อตขึ้นจากการคำนวณ

## Annual circulation patterns and lake classification

การหมุนเวียนของน้ำในทะเลสาบในรอบปี มีนักชลธีวิทยาหลายคนแบ่งออกไม่เหมือนกัน ก็มี แบ่งออกได้

1. **Amixis (Amictic lake)** หมายถึง ทะเลสาบ ซึ่งน้ำไม่ผสมกันบนผิว และอุณหภูมิไม่เกิน  $4^{\circ}\text{C}$  หรือต่ำกว่า  $4^{\circ}\text{C}$  มีน้ำแข็งปกคลุม มันสูงกว่าระดับน้ำทะเลที่เส้นรุ้ง ทำมุมกับเส้นศูนย์สูตรมากกว่า  $80^{\circ}\text{C}$  เช่น Lake Hazen ( $81^{\circ} 50' \text{N lat}$ ) มันถูกพบที่เส้นรุ้งสูงหรือต่ำ Ablation หมายถึง การสูญเสียน้ำแข็ง โดยการละลาย และระเหยกลายเป็นไอ, มีความเกี่ยวเนื่องกับอุณหภูมิในบรรยากาศ

2. **Holomixis** หมายถึง ทะเลสาบซึ่งมีกระแสลมพัด ทำให้น้ำผสมกันตลอดในเวลาอากาศเย็น

3. **Oligomictic lake (tropical lake)** หมายถึง ทะเลสาบซึ่งมีน้ำหมุนเวียนเล็กน้อยในช่วงฤดูร้อน, น้ำอุ่นตลอด, มีการเปลี่ยนแปลงต่อการเปลี่ยนของฤดูเล็กน้อย มีการแบ่งชั้นที่ผิวบนทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น แตกต่างกว่าชั้นล่าง (Fig. 8-3), อุณหภูมิสูงกว่า  $4^{\circ}\text{C}$  เช่น Lake Geneva, Lake Ohrid

4. **Monomictic lake (Monomixis)** หมายถึง ทะเลสาบมีการหมุนเวียนของน้ำหนึ่งครั้งในรอบปี, ปรกติมีอากาศทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล แบ่งออกได้ 2 ชนิด

4.1 **Cold monomixis** หมายถึง ทะเลสาบที่มีน้ำแข็งปกคลุมในช่วงฤดูหนาว ทำให้เกิดการแบ่งแยกชั้นขึ้น เมื่อน้ำแข็งละลายในฤดูใบไม้ผลิ, น้ำจะมีการหมุนเวียนหนึ่งครั้ง ในฤดูร้อน อุณหภูมิบนผิวน้ำไม่สูงกว่า  $4^{\circ}\text{C}$  บางทีมันมีอีกชื่อหนึ่งว่า Polar lake เช่น New Quebec Crater lakes

4.2 **Warm monomictic (subtropical lake)** หมายถึง ทะเลสาบมีน้ำหมุนเวียนหนึ่งครั้งในฤดูหนาว อุณหภูมิสูงกว่า  $4^{\circ}\text{C}$ , มีการแบ่งชั้นในฤดูร้อน, ไม่มีน้ำแข็งปกคลุมบนผิว เช่น Figer lake ใน N.Y.

5. **Dimictic lake (temperate lake)** หมายถึง ทะเลสาบมีน้ำหมุนเวียนผสมกัน 2 ครั้งในรอบปี ในช่วงฤดูใบไม้ผลิ และฤดูใบไม้ร่วง อุณหภูมิต่ำกว่า  $4^{\circ}\text{C}$  ที่แท้จริงแล้ว dimictic lake ที่อยู่ที่ temperate zone มีอุณหภูมิหมุนเวียนปรกติ เรียก typical lake ใน typical dimictic lake นี้ จะมีการหมุนเวียนของน้ำ และเกิดการแบ่งชั้นของน้ำในรอบปีเรียก Dimictic Cycle เริ่มจากเมื่อมาถึงฤดูใบไม้ร่วง อุณหภูมิบนผิวน้ำเริ่มลดลง อุณหภูมิในทะเลสาบไม่เกิน  $4^{\circ}\text{C}$  ความหนาแน่นของน้ำไม่ค่อยแตก

ต่างกัน ทั้งชั้นผิวบนและผิวล่าง กระแสลมพัดทำให้เกิดการหมุนเวียนของน้ำจากบนลงล่าง และล่างขึ้นบน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Fall turn over สิ่งที่มีชีวิตอยู่ชั้นล่างไม่ตาย เพราะมีการแลกเปลี่ยนแก๊ส, ของเสียจากผิวล่างสู่ผิวบน เมื่อย่างเข้าฤดูหนาว ผิวทะเลสาบจะคลายความร้อนสู่บรรยากาศ อากาศเริ่มเย็นลงจนถึงจุดแข็งตัว มันจับตัวเป็นน้ำแข็ง, ความหนาแน่นของน้ำผิวบน และชั้นล่างจะแตกต่างกัน กระแสลมไม่สามารถทำให้น้ำเกิดการหมุนเวียน ทำให้เกิดการแบ่งชั้นขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Winter stagnation สิ่งที่มีชีวิตที่อยู่กันพื้นน้ำส่วนมากจะตาย เพราะไม่มีการแลกเปลี่ยนแก๊ส, ของเสียจากผิวบนสู่ผิวล่าง ทำให้อุณหภูมิชั้นล่างเกิดสะสมแก๊สพิษของเสียมากขึ้น พอมาถึงฤดูใบไม้ผลิ อุณหภูมิเริ่มสูงขึ้น จนวัดอุณหภูมิจากผิวบนตลอดผิวล่างได้ 4 °C น้ำแข็งละลาย ความหนาแน่นของน้ำผิวบน และล่างไม่ต่างกันมากนัก เมื่อมีลมพัดจะทำให้เกิดการหมุนเวียนขึ้น สิ่งที่มีชีวิตก็ไม่ตาย เพราะมีการถ่ายเทแก๊สและของเสีย ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Spring turnover พอมาถึงฤดูร้อน อุณหภูมิของน้ำเริ่มสูงขึ้น ความหนาแน่นของผิวบนและล่างต่างกันมาก กระแสลมไม่สามารถพัด ทำให้น้ำจากผิวบนลงสู่ล่าง และล่างขึ้นบนไม่ได้ เกิดการแบ่งชั้นขึ้น สิ่งที่มีชีวิตที่อยู่ชั้นล่างจะตาย เพราะไม่มีการถ่ายเทแก๊สพิษ, ของเสียสู่ผิวบน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Summer Stagnation Dimictic cycle มี Text บางเล่มเขียนเป็น The annual temperature cycle หรือ Thermal Stratification

ตัวอย่างของลมในฤดูใบไม้ผลิ มีผลต่อความร้อนในชั้น hypolimnion โดยเปรียบเทียบ Tom Wallace Lake ที่ Kentucky กับ Lake Itasca ที่ Minnesota Tom Wallace lake ลึก 8.7 m และระหว่าง winter น้ำไม่จับเป็นน้ำแข็ง Lake Itasca ลึก 14 m มีน้ำจับตัวเป็นน้ำแข็ง Tom Wallace เป็นทะเลสาบเล็ก, ผิวน้ำเล็ก, maximum length = 0.33 km. Itasca ตรงข้าม maximum length = 4 km. มีลม มีความแตกต่างในการแจจแจงในรายละเอียดเกี่ยวกับรูปร่าง และกระแสลมมีผลต่ออุณหภูมิของทะเลสาบทั้งสอง ใน Tom Wallace ชั้น hypolimnion มีอุณหภูมิไม่เกิน 7° หรือ 8° C ขณะที่ Itasca ชั้น hypolimnion มีอุณหภูมิไม่เกิน 11° C ถึง 15° C (Fig. 8-6)

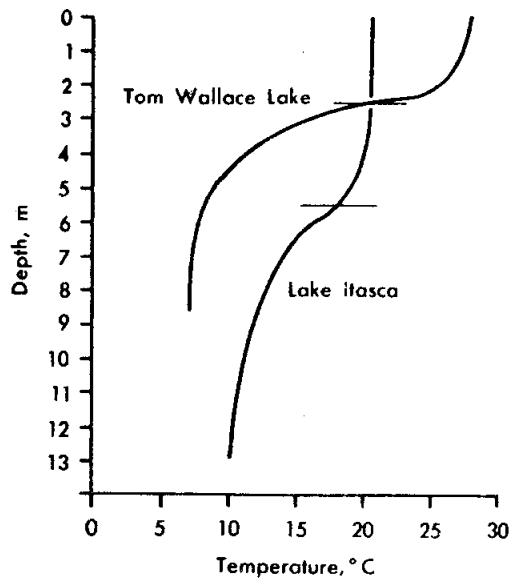


Fig. 8-6. Comparison of summer temperature profiles from Tom Wallace Lake, 26 June 1954, and Lake Itasca, 26 June 1970. Horizontal lined indicate planar thermoclines. Although Lake Itasca is 9° farther north, it has a warmer hypolimnion and a higher mean temperature because of a prolonged vernal circulation period.

น้ำแข็งที่พบมากใน Dimictic และ cold monomictic ในระหว่างฤดูหนาว แบ่งออกเป็น 4 ชั้น ได้แก่

1. Granular ice คือน้ำแข็งที่ประกอบด้วยผลึกเล็ก ๆ ที่จะสลายกลายเป็น Turbulent หรือหิมะ

2. Columnar ice คือน้ำแข็งเป็นแท่งตั้งในแนวตั้งยาว

3. Porphyritic ice คล้ายกับ columnar ice แต่แตกต่างกันตรงที่ผลึกเล็กกว่า

4. Tubular ice คือน้ำแข็งที่มีผลึกน้ำแข็งกว้างใหญ่มากตั้งอยู่ในแนวตั้ง

6. Polymictic lake (Polymixis) หมายถึง ทะเลสาบที่มีน้ำหมุนเวียนผสมกันบ่อย ๆ ในรอบปี อุณหภูมิขึ้น ๆ ลง ๆ มีอิทธิพลมากกว่าการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาล อุณหภูมิสูงกว่า 4°C เล็กน้อย ตัวอย่างเช่น ใน Andean ponds ขนาดเล็ก น้ำผิวบนรับความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการแบ่งชั้นในเวลากลางวัน ตกกลางคืนน้ำบนผิวเย็นลง เกิดกระแสคลื่น convection current ทำลายการแบ่งชั้นเสีย

## อุณหภูมิมีอิทธิพลทำให้ความร้อนเกิดการเปลี่ยนแปลง (Table 8-3)

Table 8-3. Latent heat of vaporization for pure water at different temperatures

$^{\circ}C$	Calories per <i>gram</i>
0	597.3
10	591.7
20	586.0
30	580.4
40	574.7

ทะเลสาบที่ตื้นจะมีการหมุนเวียนตลอดไม่ว่าสภาพภูมิอากาศจะเป็นอย่างไร

Polymictic lake แบ่งออกได้ 2 ชนิด

6.1 **Warm Polymictic** หมายถึง ทะเลสาบที่มีการหมุนเวียนของกระแส น้ำ (turnover) บ่อย ๆ

6.2 **Cold Polymictic** หมายถึง ทะเลสาบที่มีการหมุนเวียนเกือบติดต่อกันตลอดเวลา

7. **Meromictic lake** (Meromixis) หมายถึง ทะเลสาบที่มีการหมุนเวียนของน้ำในเวลาที่หนึ่งแต่ไม่ครบรอบ ซึ่งตรงกันข้ามกับ holomixis, มวลน้ำทั้งหมดไม่ได้มีส่วนร่วมในการผสม ชั้นของกันพื้นน้ำ มีพวกสิ่งมีชีวิตที่ตาย, มีพวก anaerobic อยู่ เช่น Austrian lake, Big Soda lake ในรัฐ Nevada

**Region of meromictic lake** แบ่งออกได้

1. **Monimolimnion** หมายถึง ชั้นล่างของ meromictic lake ประกอบด้วยสารละลายที่มีความเข้มข้นมาก เรียงเป็นชั้นมากกว่าที่พบอยู่ในน้ำ

2. **Mixolimnion** หมายถึง ชั้นบนของ meromictic lake ที่เจือจางมาก ถูกลมพัดทำให้เกิดการผสมกัน และแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาล

3. ในระหว่างชั้น mixolimnion และ monimolimnion ได้แก่ชั้น **Chemocline** มีความเค็มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

ความหนาแน่นของความสูงค่าของอุณหภูมิจากระดับหนึ่งไปยังอีกระดับหนึ่งในแนวตั้งในชั้น Chemocline คล้ายคลึงกับชั้น Thermocline แม้ว่าชั้นใหญ่ที่พวก material ทำหน้าที่ในน้ำมากกว่าในอุณหภูมิ (Fig. 8-7)

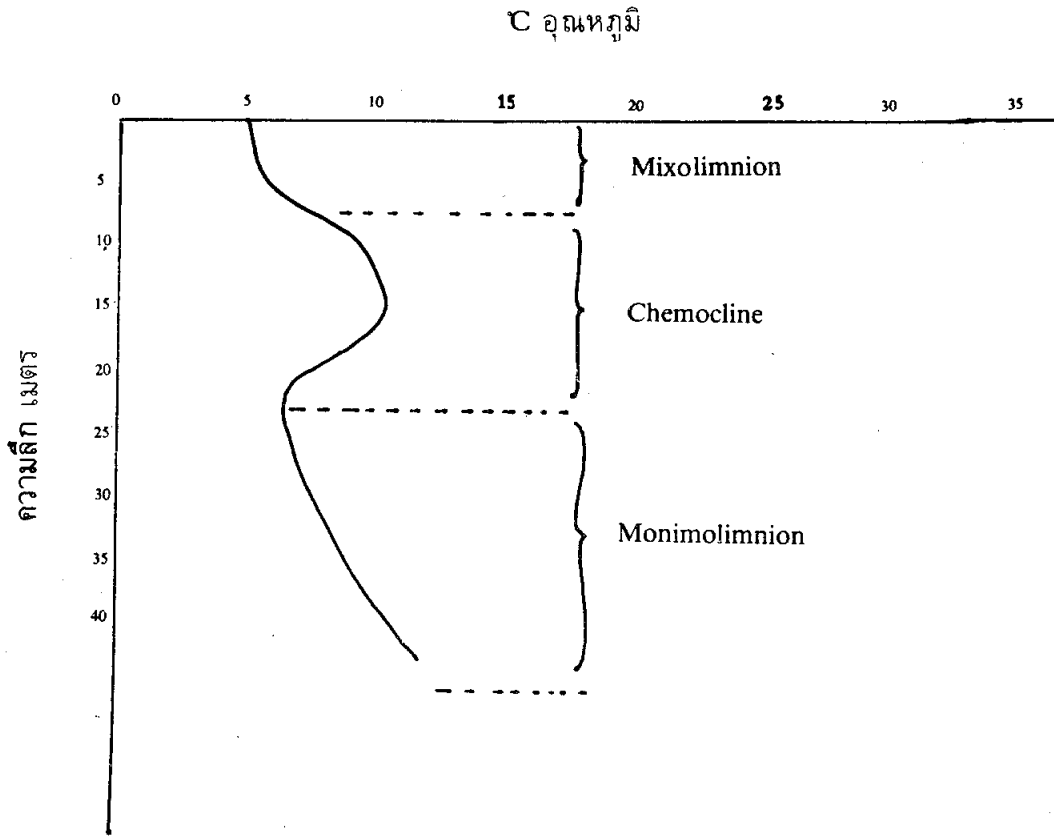


Fig. 8-7 แสดงถึง region of meromictic lake

**Meromictic lake แบ่งออกได้**

1. **Biogenic meromixis** หมายถึง meromictic lake ที่มีสิ่งที่มีชีวิต เช่น แบคทีเรีย, เกลือแร่ สะสมมากในชั้นของ monimolimnion ตัวอย่างทะเลสาบในอเมริกาเหนือ มีพวก แบคทีเรีย,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaHCO}_3$  เช่น Austrian Langsee

Table 8-4. Relative depths ( $Z_m$ ) of types of meromictic lakes in North America

Type of <b>meromictic</b> lake	Relative depth (percent)
<b>Ectogenic and crenogenic lakes</b>	
Big Soda. Nevada	1.17
Blue. Washington	2.90
Hot, <b>Washington</b>	2.70
Long (northern tip). Alaska	2.00 (?)
<b>Lower Goose, Washington</b>	3.76
<b>Nitnat, British Columbia</b>	3.37
<b>Ogac, Baffin Island</b>	4.40
<b>Pingo, Alaska</b>	5.50
Powell. British Columbia	3.60
<b>Sakinaw, British Columbia</b>	<b>4.38</b>
Soap. Grant Co.. Washington	1.16
soap. <b>Okanogan Co.. Washington</b>	1.29
<b>Tessiarsuk, Labrador</b>	2.05
Vee. Alaska	0.70
Wannacutt. Washington	2.77
<b>Partial meromixis, ectogenic</b>	
Cinder Cone Pool in <b>Zuñi Sail Maar, New Mexico</b>	4.49
Green Pond, Arizona	6.54
Red Pond. <b>Arizona</b>	4.27
<b>Biogenic meromictic lakes</b>	
Arco, Minnesota	7.67
Budd, Minnesota	6.77
Canyon. Michigan	9.69
Demming. Minnesota	7.92
<b>Fayetteville Green, New York</b>	10.03
Hall. Washington	8.46
Josephine. Minnesota	<b>5.27</b>
Mary. Wisconsin	20.36
Sodon, Michigan	10.03
<b>Squaw (protected bay only). Minnesota</b>	22.80
Stewart's <b>Dark, Wisconsin</b>	9.03

มีการพยายามที่ป้องกันทะเลสาบใน Minnesota forests ซึ่งเป็น meromictic lake บางส่วน เช่น Demming lake (Fig. 8-8) มีการหมุนเวียนของน้ำตลอด Findenegg (1937) ว่าทะเลสาบนี้จัดอยู่ในระหว่าง holomixis และ meromixis เพราะ oligomictic เข้ามาเกี่ยวข้อง

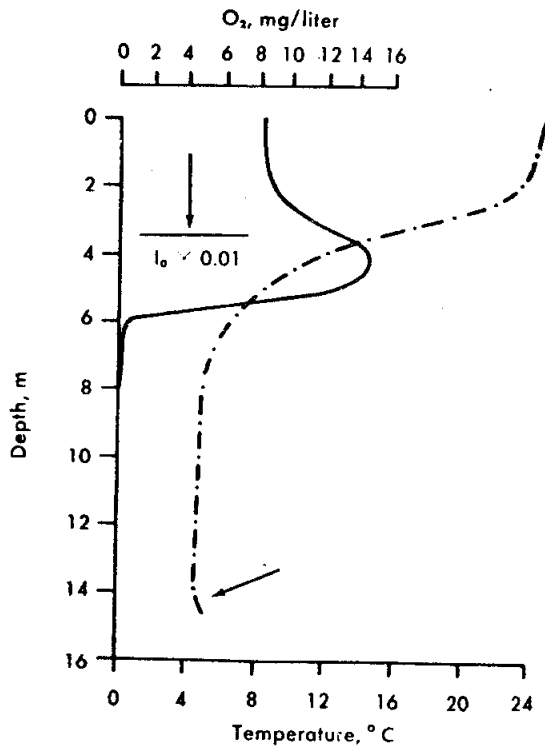


Fig. 8-8. Demming Lake, Minnesota, 3 July 1963. Arrow points to slight dichothermic temperature curve. A positive heterograde oxygen curve is present with a metalimnetic peak, and the lower level of the euphotic zone ( $I_0 \times 0.01$ ) is indicated.

2. **Ectogenic meromixis** หมายถึง meromictic lake ที่มีน้ำจากภายนอกไหลเข้ามา ซึ่งน้ำที่ไหลเข้ามาเป็นน้ำที่มีเกลือปนอยู่ (ความเค็ม) มาที่ชั้น mixolimnion หรือชั้น monimolimnion (Table 8-4)

ความทนทานของ ectogenic meromixis ขึ้นอยู่กับหน้าที่ความเค็มที่แตกต่างกัน มันมีความเค็มมาก ดังนั้น ions ของเกลือเป็นส่วนแตกต่างจากอัตราส่วนของ biogenic meromictic lake ทะเลสาบนี้มักพบในท้องถิ่นทุรกันดาร เช่น Hol lake ใน Washington มี  $MnSO_4$  มาก

3. **Crenogenic meromixis** หมายถึง meromictic lake ที่มีน้ำที่มีความเค็ม (เกลือปนอยู่) ไหลเข้ามาทำให้น้ำที่มีอยู่ และที่เข้ามาอยู่ในสภาพสมดุลย์ (equilibrium) ในชั้น chemocline ตัวอย่างเช่น African lake Kivu



จุดกำเนิดเริ่มต้นของ meromictic lake มักจะเป็นแบบ ectogenic ก่อนแล้วต่อมาก่อเป็น crenogenic

#### Other phenomena establishing meromixis

Goldman และผู้ร่วมงาน (1967) ศึกษา Antarctic lakes ว่าวิธีการปล่อยเกลือเข้าสู่ monimolimnion และลดความเค็มบนผิวชั้นบนของน้ำ เรียกว่า cryogenesis นี้คือ วิธีการง่าย ๆ ที่จะทำให้แข็งตัวในเวลาหนึ่ง Cole และเพื่อนร่วมงาน (1967) ว่า meromixis ช่วงเวลาระหว่างฤดูหนาวในบ่อ 2 บ่อ คือ Arizona saline ponds มันจะแข็งตัวในเวลากลางคืน, เวลากลางวันละลาย น้ำแข็งที่ละลายจากบ่อเมื่ออรอนแล้ว มีความเค็ม 11.6 gm/lit ถ้าไม่กรอนมี 41 gm/lit น้ำแข็งที่ละลายจะอยู่บนชั้นของเกลือ

ปรากฏการณ์ที่คล้ายกันในน้ำเกลือ ฤดูหนาวจะเกิดตะกอนของ  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  มันจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง

#### Unusual Temperature Profile

ชั้นของอุณหภูมิในทะเลสาบอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงผิดปกติ เมื่อพล็อตกราฟดู จะเห็นจาก curve Fig. 8-9

Curve ที่แสดงถึงอุณหภูมิล้ำคล้ายคลึงกันมีคุณสมบัติผิดกันเรียก diathermic curve, พบว่าชั้นเย็นสุดอยู่ที่กลางทะเลสาบ ไม่ใช่อยู่ที่ก้นพื้นทะเลสาบในฤดูร้อน เช่น Fayetteville Green lake

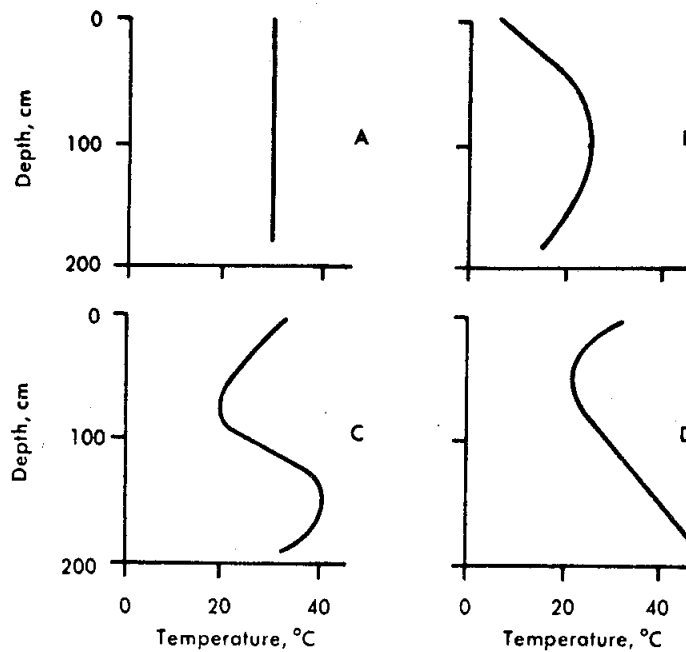


Fig. 8-9. Idealized vertical temperature curves shown at different seasons at Red Pond, Arizona. A, Isothermal curve in late summer; B, mesothermal curve in late winter; C, poikilothermal curve in late spring; and D, dichothermal curve in early summer. (Modified from Cole and co-workers 1967.)

**Dichothermy** คือ curve ของอุณหภูมิในแนวตั้ง ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลง curve ของมันจากบน เป็นล่าง มีจุดต่ำสุดหนึ่งตรงบริเวณทางเหนือหรือทางใต้ของกระแสน้ำอุ่น (Figs. 8-9, และ 8-9, D)

Dichothermy เป็นคุณลักษณะของ meromictic lake, ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อย จะถูกพบใน ก้นพื้นน้ำในฤดูร้อน

จุดกำเนิดความร้อนใน monimolimnion ชับซ้อน, แต่ใน meromictic lakes ส่วนมากมันเป็น biogenic, bacterial metabolism เป็นส่วนใหญ่ Zobell และผู้ร่วมงาน (1953) ประมาณว่าใน holomictic lake Mead มี microorganisms สร้างความร้อนจำนวน  $30 \times 10^{-12}$  cal |cell| hr. ส่วน monimolimnion ไม่มีการสะสมความร้อน เพราะความร้อนจะสูญเสียในการนำความร้อน

### Mesothermy

ในน้ำที่มีชั้นของเกลือไม่ปกติ บังเกิดขึ้นเมื่อ Vertical temperature profile บอกระดับจุดสูงภายใน curve อุณหภูมิเพิ่มขึ้น เมื่อลึกลงไป แต่จะลดลงก่อนถึงก้นพื้นน้ำ ผลของชั้นอุณหภูมิปานกลาง บังถึงชั้นอุ่นอยู่ระหว่างชั้นบน และชั้นล่างเย็น (Fig. 8-9, B)

### Poikilothermy

เป็นกราฟที่มีอุณหภูมิซับซ้อน ซึ่งลากจากจุดต่ำไปยังจุดสูง (Fig. 8-9, C) ใน Lon-H pond, poikilothermic curve แสดงการเปลี่ยนจาก mesothermy เป็น dichothermy ก่อนที่ความร้อนจะซึมผ่านลงข้างล่าง จากชั้นกลางของน้ำอุ่น เพื่อที่จะสูงขึ้นในชั้นต่ำ จากผลนี้ ชั้นบนอุ่นบางที่จะผสมจมลง จนกระทั่งหายไปใก้นพื้นน้ำ