

วิธีการวัดอัตราการไหลของน้ำแบบเทอร์โมไซฟอน

ในระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบ

(MEASUREMENT of THERMOSYPHON FLOW  
in FLAT-PLATE SOLAR HOT WATER SYSTEM)



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาอี เลคทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหาร-ลาดกระบัง

๓๙๗.

๒๖๔๔๐

๘๐๒๔

๒๑.

๐๑๐๐๔๗

ตุลาคม พ.ศ. ๒๕๖๔

หัวข้อวิทยานิพนธ์      วิธีการวัดอัตราการไหลของน้ำแบบเทอร์โมไซฟอน  
ในระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบ

โดย      บุญรักษ์ จิณีภพ

อาจารย์ที่ปรึกษา      ดร.กฤษณพงศ์ กีรติกร  
รศ.ดร.ไพรัช ธัชยพงษ์

ระดับการศึกษา      ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา      อิเลคทรอนิกส์

ปีการศึกษา      ๒๕๒๔



บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นการสร้างอุปกรณ์การวัดอัตราการไหลของน้ำแบบเทอร์โมไซฟอน

ในระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ โดยการวัดเวลาที่หยดน้ำมันผสมซึ่งมีความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกับของน้ำ ใช้ในการเคลื่อนที่ระหว่างระยะทางที่กำหนด การวัดเวลาของการเคลื่อนที่ใช้อุปกรณ์อิเลคทรอนิกส์

เมื่อใช้อุปกรณ์ดังกล่าววัดอัตราการไหลของน้ำในท่อ ซึ่งเกิดจากถังจ่ายน้ำซึ่งมีความสูงคงที่ โดยปรับให้อัตราการไหลมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับการไหลแบบเทอร์โมไซฟอน คือ 0 ถึง 40 ล.บ.ช.ม./วินาที (โดยประมาณ) ปรากฏว่าให้ผลแม่นยำพอสมควร เมื่อต่ออุปกรณ์ดังกล่าวเข้ากับระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์แบบตัวรับรังสีแผ่นราบ สามารถวัดอัตราการไหลอย่างเที่ยงต่อเนื่องของน้ำที่ไหลแบบเทอร์โมไซฟอนในระบบดังกล่าวได้ เป็นครั้งแรกในประเทศไทย และสามารถคำนวณประสิทธิภาพชั่วขณะของแผงรับรังสีแบบแผ่นราบได้

Thesis Title            Measurement of Thermosyphon Flow  
   in Flat-Plate Solar Hot Water System

By                            Mr.Boonruk Chipipop

Supervisors            Dr.Krissanapong Kirtikara  
   Associate Professor Dr.Pairash Thajchayapong

Level of Study        Master of Engineering (Electrical Engineering)

Department            Electronics

Academic Year        1981

Abstract

The thesis involves the development of a low cost thermosyphon flow measuring equipment for solar water heaters. The flow rate is determined from the time of flight of viscous oil droplets, having a specific gravity nearly equal to that of water, between fixed distances along the flow using electronic timers.

The accuracy of the equipment was demonstrated by measuring a simulated flow from a constant head source which was adjusted to yield flow rates comparable to those of thermosyphon flow. The results obtained were in good agreement with the known set flow rates.

By incorporating the equipment to a solar water heater using a flat-plate collector, thermosyphon flow rates of the system were measured for the first time in Thailand. Instantaneous efficiencies of the collector were subsequently derived.

## กิติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร. กฤษณพงศ์ กีรติกร อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยครั้งนี้จนประสบผลสำเร็จ ขอขอบคุณ รศ.ดร. ไพรัช รัชพงษ์ ที่กรุณาช่วยติดต่อประสานงาน รศ.ดร. ปรีดา วิบูลย์สวัสดิ์ ที่ได้ให้คำแนะนำทางด้านพลังงานแสงอาทิตย์ ผศ.ดร. ศักรินทร์ ภูมิรัตน ที่อนุญาตให้ใช้ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือของภาควิชาวิศวกรรมเคมี สจ.ธ. และให้คำแนะนำเกี่ยวกับปัญหาทฤษฎี-ของไหล คุณสนธิ ปรีนคร แห่งภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยเหลือในการเป่าแก้ว คุณอนันต์ มั่นสสภิตย์ จาก University of New South Wales, AUSTRALIA คุณธวัชชัย เจริญสมบัติอมร จาก Rice University, U.S.A. ที่ช่วยจัดหาเอกสารที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย และขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ ที่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้

นอกจากนี้ขอขอบคุณ อาจารย์ฉลองศรี วานิชกร เป็นพิเศษ ที่ช่วยเหลือในการเก็บข้อมูล และแก้ปัญหาต่าง ๆ จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ และคณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตธนบุรี ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยทั้งหมด และให้ใช้สถานที่ทดสอบงานวิจัยนี้

ส่วนดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบให้ อาจารย์ ดร. กฤษณพงศ์ กีรติกร



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
คำอุทิศ	IV
สารบัญ	V
สัญลักษณ์	IX
บทที่ 1	1
1.1	1
1.2	2
1.3	28
บทที่ 2	30
2.1	30
2.1.1	31
2.1.1-1	31
2.1.1-2	33
2.1.1-3	34
2.1.1-4	35
2.1.1-5	36
2.1.2	42

2.2	การไหลของน้ำในท่อกลม	45
2.2.1	สมการเบื้องต้นสำหรับการไหลของน้ำในท่อ	45
2.2.2	การไหลแบบ fully developed laminar ในท่อกลม	49
2.2.3	Minor Losses ในระบบท่อ	51
2.2.3-1	การขยายขนาดท่ออย่างทันทีทันใด	51
2.2.3-2	การลดขนาดท่ออย่างทันทีทันใด	52
2.2.3-3	การสูญเสียเนื่องจากส่วนโค้งของท่อ ประตูน้ำ และข้อต่อต่าง ๆ	52
2.2.4	Profile ของความเร็วของน้ำที่ไหลจากถังเข้าสู่ท่อกรณีที่มีการไหลแบบลามินาร์	55
2.3	การวิเคราะห์ความเร็วเฉลี่ยของหยดน้ำมันที่มีขนาดต่าง ๆ ซึ่งไหลไปในท่อที่มีน้ำไหลแบบ fully developed laminar	56
2.4	การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพช่วงขณะ	57
บทที่ 3	หลักการวัด และ อุปกรณ์ที่ใช้วัด	58
3.1	หลักการวัด	58
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้วัด	60
3.2.1	อุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วน้ำ	60
3.2.1-1	ชุดฉีดหยดน้ำมัน	60
3.2.1-2	แหล่งกำเนิดแสงและชุดตรวจจับ	63
3.2.1-3	อุปกรณ์จับเวลาอิเล็กทรอนิกส์	66
3.2.2	อุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิ	68
3.2.3	อุปกรณ์ที่ใช้วัดรังสีดวงอาทิตย์	69
3.3	ระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบ	71
บทที่ 4	การทดลอง และการวิจารณ์	76
4.1	การทดลองเบื้องต้น	76

4.3	การวัดอัตราการไหลแบบเทอร์โมไซฟอนในระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์	96
บทที่ 5	สรุปและข้อเสนอแนะ	104
	บรรณานุกรม	106
ภาคผนวกที่ 1	ขนาดของเครื่องมือวัดความเร็วน้ำ และอื่น ๆ	113
ผ-1.1	ท่อแก้ว	114
ผ-1.2	แหล่งกำเนิดแสงและชุดตรวจจับ	116
ผ-1.3	การออกแบบวงจรของอุปกรณ์จับเวลาอิเล็กทรอนิกส์	119
ผ-1.4	สาเหตุของสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า และวิธีแก้ไข	130
ผ-1.5	ราคาอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วน้ำ	134
ผ-1.6	การเตรียมน้ำมันผสม	134
ภาคผนวกที่ 2	ตารางคุณสมบัติ	137
ผ-2.1	น้ำ	138
ผ-2.2	Carbon Tetrachloride	139
ผ-2.3	น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว	143
ผ-2.4	น้ำมันดีเซลหมุนช้า	144
ผ-2.5	น้ำมันหล่อลื่น TALPA 30	145
ผ-2.6	น้ำมันหล่อลื่น VITREA 220	146
ผ-2.7	หลอดทังสเตน	147
ผ-2.8	Zenamic (Metal Oxide Varistor)	148
ผ-2.9	ICM 7215 IPG	153
ผ-2.10	ICM 7555 IPG	159
ผ-2.11	CMOS เบอร์ 4050 B	165
ผ-2.12	CMOS เบอร์ 4066 B	169
ผ-2.13	CMOS เบอร์ 4071 B	174

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ-2.14 LM 317

182

ผ-2.15 7-Segment LED Display

186

ภาคผนวกที่ 3 ข้อมูลจากการทดสอบเครื่องมือวัดความเร็วน้ำที่สร้างขึ้น

191



สัญลักษณ์

<u>Symbol</u>	<u>Quantity</u>	<u>หน่วย</u>
A	พื้นที่หน้าตัดภายในของท่อ	$m^2$
A	ค่าคงที่ อุสมการที่ (2-1)	-
A <sub>C</sub>	พื้นที่รับแสงของแผงรับรังสี	$m^2$
B	ค่าคงที่ อุสมการที่ (2-1)	-
b	ความยาวของ bond	m
C	ค่าคงที่ อุสมการที่ (2-1)	-
C <sub>b</sub>	bond conductance	$W/m^2 \cdot K$
C <sub>c</sub>	กำหนดโดยสมการที่ (2-70)	-
C <sub>P</sub>	ความร้อนจำเพาะ (ที่แรงดันคงที่)	J/Kg.K
D	เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อส่งน้ำ	m
D	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ riser	m
D <sub>i</sub>	เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ riser	m
d	เส้นผ่าศูนย์กลางของหยดน้ำมันผสม	m
F	กำหนดโดยสมการที่ (2-30)	-
F'	collector efficiency factor	-
F''	collector flow factor	-
F <sub>R</sub>	collector heat removal factor	-
f	friction factor	-
f(h)	กำหนดโดยสมการที่ (2-3)	-
G	อัตราการไหลของมวลของน้ำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่	$\cdot Kg/s \cdot m^2$
G <sub>r</sub>	Grashof number	-
G <sub>1</sub>	กำหนดโดยสมการที่ (2-20)	-
g	ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วง	$m/s^2$

<u>Symbol</u>	<u>Quantity</u>	<u>หน่วย</u>
H	ความสูงของท่อ riser	m
$H_f$	head loss เนื่องจากการเสียดทาน	m
$H_T$	thermosyphon head	m
$H_t$	total radiation on horizontal plane	$W/m^2$
$H_{TA}$	กำหนดโดยสมการที่ (2-22)	m
$H_{TB}$	กำหนดโดยสมการที่ (2-23)	m
h	ความสูง	m
h	heat transfer coefficient	$W/m^2 \cdot K$
$h_c$	head loss เนื่องจากการลดขนาดท่อ	m
$h_e$	head loss เนื่องจากการขยายขนาดท่อ	m
$h_L$	head loss	m
$h_w$	heat transfer coefficient เนื่องจากลม	$W/m^2 \cdot K$
$h_{f,i}$	heat transfer coefficient เนื่องจากน้ำ เข้าแผงรับรังสี	$W/m^2 \cdot K$
$h_{p-c}$	heat transfer coefficient ระหว่างแผ่นดูดรังสี กับแผ่นครอบใส	$W/m^2 \cdot K$
$h_{r,p-c}$	radiation heat transfer coefficient ระหว่างแผ่นดูดรังสีกับแผ่นครอบใส	$W/m^2 \cdot K$
$h_{r,c-sky}$	radiation heat transfer coefficient ระหว่างแผ่นครอบใสกับท้องฟ้า	$W/m^2 \cdot K$
$K_1, K_2$	kinetic energy correction factor	-
K	head loss coefficient	-
$K_L$	กำหนดโดยตารางที่ 4 (บทที่ 2)	-

<u>Symbol</u>	<u>Quantity</u>	<u>หน่วย</u>
$K_L$	head loss coefficient เนื่องจากการไหลแบบ fully developed laminar	-
$K_T$	head loss coefficient เนื่องจากการไหลแบบเทอร์บูเลนต์	-
$k$	thermal conductivity	W/m. <sup>2</sup> K
$k_{air}$	thermal conductivity ของอากาศ	W/m. <sup>2</sup> K
$k_b$	thermal conductivity ของ bond	W/m. <sup>2</sup> K
$k_i$	thermal conductivity ของฉนวน	W/m. <sup>2</sup> K
$L$	ความยาว	m
$L$	thermal development length	m
$L'$	transition length	m
$l$	ความยาวของท่อ	m
$M$	กำหนดโดยสมการที่ (2-13)	-
$M'$	กำหนดโดยสมการที่ (2-31)	-
$\dot{m}$	อัตราการไหลของมวลของน้ำ	Kg/s
$Nu$	Nusselt number	-
$Pr$	Prandtl number	-
$p$	แรงดัน	N/m <sup>2</sup>
$Q$	อัตราการไหลแบบปริมาตรของน้ำ	m <sup>3</sup> /s
$Q_u$	พลังงานความร้อนที่แผงรับรังสีรับได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลา	J/s
$R$	อัตราส่วนระหว่างรังสีรวมบนพื้นเอียงต่อรังสีรวมบนพื้นราบ	-
$R$	รัศมีภายในของท่อส่งน้ำ	m
$r$	รัศมี, รัศมีของหยดน้ำมันผสม	m

<u>Symbol</u>	<u>Quantity</u>	<u>หน่วย</u>
$R_n$	Reynolds number	-
$S$	ความถี่จำเพาะ	-
$S$	พลังงานแสงอาทิตย์ที่ถูกดูดไว้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่	$J/m^2$
$s$	มุมเอียงของแผงรับรังสีจากแนวราบ	องศา
$T$	อุณหภูมิ	K หรือ $^{\circ}C$
$T_a$	อุณหภูมิแวดล้อม	
$T_c$	อุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นครอบใส	
$T_i$	อุณหภูมิเฉลี่ยของฉนวน	
$T_m$	อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในระบบ	
$T_{m,i}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเข้าท่อ riser	
$T_{m,o}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำออกจากท่อ riser	
$T_{m,L}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำที่ระยะทาง L	
$T_p$	อุณหภูมิของแผ่นดูดแสง	
$T_{f,i}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเข้าแผงรับรังสี	
$T_{f,o}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำออกจากแผงรับรังสี	
$t$	เวลา	วินาที
$U_L$	overall heat transfer coefficient	$W/m^2 \cdot K$
$U_b$	back surface heat transfer coefficient	$W/m^2 \cdot K$
$U_t$	top surface heat transfer coefficient	$W/m^2 \cdot K$
$U_2$	heat transfer coefficient ระหว่างแผ่นครอบใสกับอากาศ	$W/m^2 \cdot K$
$v$	ความเร็วเฉลี่ยของน้ำ	m/s
$v$	ความเร็วของน้ำ, ลม	m/s
$v_b$	ความเร็วเฉลี่ยจริง ๆ ของหยดน้ำมันผสม	m/s
$v'_b$	ความเร็วเฉลี่ยของหยดน้ำมันผสมที่วัดได้	m/s

<u>symbol</u>	<u>Quantity</u>	<u>หน่วย</u>
$V_w$	ความเร็วเฉลี่ยของน้ำ	m/s
$v^*$	frictional velocity	m/s
$W$	ระยะห่างระหว่างท่อ riser	m
$x$	ระยะทาง	m
$z$	ความสูงจาก datum line	m



สัญลักษณ์ (กรีก)

<u>Symbol</u>	<u>Quantity</u>	<u>หน่วย</u>
$\rho$	reflectance	-
$\rho_d$	diffuse reflectivity	-
$\rho$	ความหนาแน่นของน้ำ	$\text{Kg/m}^3$
$\bar{\rho}$	ความหนาแน่นเฉลี่ยของน้ำตลอดพื้นที่หน้าตัดของท่อ	$\text{Kg/m}^3$
$\sigma$	Stefan-Boltzmann constant	$\text{W/m}^2 \text{K}^4$
$\delta$	ความหนาของแผ่นดูดรังสี	m
$\mu$	ความหนืด	$\text{N}\cdot\text{s/m}^2$
$\nu$	ความหนืด kinematic	$\text{m}^2/\text{s}$
$\gamma$	weight density	$\text{N/m}^3$
$\gamma$	ความหนาของ bond	m
$\beta$	coefficient of volume expansion	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
$\epsilon$	emittance	-
$\alpha$	thermal diffusivity	$\text{m}^2/\text{s}$
$\alpha$	absorptance	-
$\tau$	shear stress	$\text{N/m}^2$
$\tau$	transmittance	-
$\tau_a$	transmittivity เนื่องจากการดูดแสง	-
$\tau_0$	frictional stress	$\text{N/m}^2$
$(\tau\alpha)$	กำหนดโดยสมการที่ (2-47)	- <sup>1</sup>
$(\tau\alpha)_e$	effective transmittance-absorbtance product	-
$\eta$	ประสิทธิภาพ	%
$\eta_i$	ประสิทธิภาพชั่วขณะ	%

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 บทนำ

ระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์-ที่มีการไหลของน้ำในระบบเป็นแบบเทอร์โมไซฟอน (thermosyphon) เป็นระบบทำน้ำร้อนที่สร้าง และติดตั้งได้ง่าย เป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา อิสราเอล ญี่ปุ่น และออสเตรเลีย โดยเฉพาะประเทศอิสราเอล ประชากรประมาณ 30% ใช้ระบบทำน้ำร้อนแบบนี้กับบ้านพักอาศัย ระบบทำน้ำร้อนแบบนี้เริ่มใช้เมื่อต้นศตวรรษที่ 20 [13] ใช้ทำน้ำร้อนให้กับบ้านพักอาศัยและค่ายทหาร

ได้มีการศึกษาระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอนอย่างกว้างขวาง จากรายงานการทดลองที่ผ่านมาทั้งแบบผลจากการทดลอง [7, 14 - 18] การวิเคราะห์ทางทฤษฎี [1, 3, 6, 19-24] และการวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่มีผลการทดลองประกอบ [1, 2, 4, 5, 8-11] ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อ 1.2

มีรายงานผลการวัดความเร็วแบบเทอร์โมไซฟอน (thermosyphon velocity) เป็นจำนวนน้อย [4, 7, 8] ซึ่งใช้วิธีการวัดต่างกันดังจะได้อธิบายในข้อ 1.2 เหตุผลที่มีการวัดความเร็วแบบเทอร์โมไซฟอนไม่มากนัก ก็เนื่องจากมีปัญหาในการวัดความเร็ว ทั้งนี้ เพราะว่าในระบบที่มีการไหลแบบเทอร์โมไซฟอนจะมีความเร็วต่ำมาก คืออยู่ในช่วง 0-10 cm/sec (โดยประมาณ) ในช่วงความเร็วขนาดนี้ ถ้าเครื่องมือที่วัดมีส่วนใดส่วนหนึ่งจุ่มเข้าไปขวางการไหลจะทำให้เกิดการเสียดทานขึ้นในวงจรของการไหล ซึ่งจะทำให้มีผลกระทบกระเทือนต่อการทำงานแบบไฮโดรไดนามิกส์ของระบบทำน้ำร้อน ในระบบทำน้ำร้อนแบบนี้จะมี thermosyphon driving head อยู่ในช่วง 1-30 mm. ของน้ำ ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้เครื่องวัดอัตราการไหลที่มีส่วนที่จุ่มเข้าไปในท่อ หรือ เครื่องมือวัดที่มีความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear resistance) วัดความเร็วของการไหลแบบนี้ได้ โดยไม่กระทบกระเทือนคุณสมบัติของระบบ

## 1.2 การวิเคราะห์ผลงานวิจัยที่ผ่านมา (Literature Survey)

Close [1] วิเคราะห์การไหลแบบเทอร์โมไฮฟอนในแผงรับรังสีแบบแผ่นราบ

อย่างคร่าว ๆ โดยมีการสมมุติต่าง ๆ ดังนี้

1. ท้องฟ้าแจ่มใส ไม่มีเมฆ หมอก ตลอดวัน
2. ไม่มีการถ่ายน้ำออกจากระบบระหว่างการทดลอง
3. รังสีดวงอาทิตย์เป็น sine function ซึ่งมีค่าสูงสุดที่เวลา 12.00 น.
4. อุณหภูมิแวดล้อมก็เป็น sine function เช่นกัน
5. การไหลของน้ำในท่อเป็นแบบ fully developed laminar
6. ความหนาแน่นของน้ำในท่อของแผงรับรังสี ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ ณ พื้นที่หน้าตัดนั้น โดยไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามแนวขวางของท่อ
7. การกระจายของอุณหภูมิของน้ำในถังสะสมน้ำร้อน และท่อ riser ของแผงรับรังสี เป็นแบบเชิงเส้น
8. การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของน้ำในถังสะสมน้ำร้อน และท่อ riser ของแผงรับรังสี เป็นแบบเชิงเส้นเช่นเดียวกัน
9. ไม่มีการสูญเสียความร้อนจากท่อส่งน้ำ (ท่อที่ต่ออยู่ระหว่างถังสะสมน้ำร้อน และแผงรับรังสี) ออกไปยังภายนอก
10. น้ำร้อนที่มาจากแผงรับรังสีจะลอยตัวขึ้นสู่ส่วนบนสุดของถังสะสมน้ำร้อน
11. ความหนืด (viscosity) ของน้ำทั้งระบบคิดจากอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบ
12. อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในถังสะสมน้ำร้อน เท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในแผงรับรังสี และเท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในระบบ

Close พิจารณาว่า ความร้อนสูญเสียทั้งหมดจากถังสะสมน้ำร้อนและแผงรับรังสี คิดจากผลคูณของสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของถังสะสมน้ำร้อนรวมกับแผงรับรังสี กับ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบกับอุณหภูมิแวดล้อม ดังนั้นความร้อนที่แผงรับรังสี ได้รับ จึงเท่ากับผลบวกของความร้อนสูญเสียทั้งหมดของระบบกับความร้อนที่สะสมอยู่ในถังสะสมน้ำร้อน ซึ่งเมื่อเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์แล้วจะอยู่ในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียลกำลังที่หนึ่ง ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่อเวลาเป็นตัวแปรอิสระ

ในการหาค่าอัตราการไหลในระบบ พิจารณาว่า thermosyphon head เท่ากับ friction head loss โดยที่ thermosyphon head คำนวณจากอุณหภูมิแตกต่างระหว่าง ส่วน 2 ส่วนในระบบ และสมมติว่า ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความหนาแน่นอยู่ในรูปสมการกำลังสอง (Quadratic equation), friction head loss คำนวณโดยใช้สมการ Darcy-Weisbach สำหรับแรงเสียดทานในการไหลแบบ fully developed laminar การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานที่ทางเข้า ทางออก ประจุน้ำ ข้อต่อและข้องอต่าง ๆ ก็ได้รับการพิจารณา ด้วย

Close ได้ทำการทดลองโดยใช้แผงรับรังสีแบบแผ่นราบ 2 แผง ซึ่งแต่ละแผงมีพื้นที่รับแสง เท่ากับ 17.5 ตารางฟุต ต่อกับ ถังสะสมน้ำร้อนขนาด 30 แกลลอน

หน่วยที่ 1 ใช้ selective absorbing surface ที่ปิดด้วยแผ่น Tedlar

หน่วยที่ 2 ใช้แผ่นทองแดงทาสีดำ ปิดด้วยกระจก 2 ชั้น

วัดอุณหภูมิน้ำเข้า-น้ำออกจากแผงรับรังสี และวัดอุณหภูมิของน้ำในถังสะสมน้ำร้อน ที่ระดับความสูงต่างกัน 4 ระดับ โดยใช้เทอร์โมสตอปเปิล

วัดรังสีดวงอาทิตย์โดยใช้ Epply Pyrheliometer ซึ่งติดตั้งอยู่ในระนาบเดียวกับแผงรับรังสี

ผลการทดลองและการคำนวณค่าต่าง ๆ สำหรับหน่วยที่ 2 ให้ผลดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าอุณหภูมิจนเฉลี่ยของถังสะสมน้ำร้อนและแผงรับรังสี ถึงแม้ว่าในการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของอุณหภูมิน้ำเข้า น้ำออกจากแผงรับรังสีจะไม่ตรงกับผลการทดลองนัก แต่ก็มีค่าใกล้เคียงกัน พอที่จะใช้คำนวณค่าอื่น ๆ ของระบบในแต่ละวันได้

สำหรับหน่วยที่ 1 ผลการทดลองไม่ค่อยสอดคล้องกับทฤษฎี ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจาก

1. รังสีดวงอาทิตย์ไม่สม่ำเสมอ และไม่เป็น sine curve
2. ไม่ทราบอุณหภูมิจนเฉลี่ยของน้ำในถังที่แท้จริง ณ เวลานั้น ๆ
3. หลังจากการทดลองปรากฏว่า แผ่น Tedlar เปลี่ยนสีไป เนื่องมาจากแผ่นโฟเบอร์ที่ใช้เป็นฉนวน

การทดลองของ Close ยังไม่ได้กล่าวถึงวิธีการวัดอัตราการไหลของน้ำในระบบ

Gupta และ Garg [2] ได้ปรับปรุงรูปร่างจำลอง (model) ของ Close [1] ให้ดีขึ้น โดยคิดถึงผลของเมฆ ที่มีต่อรังสีดวงอาทิตย์ แต่ยังคงไม่มีการถ่ายเทน้ำออกจากระบบ ระหว่างการทดลอง นอกจากนี้ยังคิดถึงผลของความจุความร้อนของท่อ และความร้อนสูญเสียของท่อด้วย สมการสมมูลย์ความร้อนแบบ instantaneous สำหรับถังสะสมน้ำร้อน และแผงรับรังสี ยังคงเหมือนของ Close ในการวิเคราะห์ยังคงสมมุติว่า อุณหภูมิเฉลี่ยของถัง - สะสมน้ำร้อน ของแผงรับรังสี และของน้ำในท่อ เท่ากันหมด คือ ทั้งระบบมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามจากข้อสมมุติต่าง ๆ เหล่านี้ ไม่สามารถที่จะใช้รูปร่างจำลองนี้ในตอนกลางคืนที่มีการไหลย้อนกลับแบบเทอร์โมไซฟอนได้ ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงไม่คิดเวลากลางคืนด้วย ต้องแยกไปคิดต่างหาก โดยคิดว่าถังสะสมน้ำร้อนและแผงรับรังสี สูญเสียความร้อนในเวลากลางคืน ตามกฎการเย็นตัวของนิวตัน

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของรังสีดวงอาทิตย์ และอุณหภูมิแสงในรูปคณิตศาสตร์ โดยใช้ Fourier Series ที่มี 12 harmonics โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ต้องหาให้เหมาะสมกับข้อมูลที่วัดได้

ในการวิเคราะห์ระบบการไหลแบบเทอร์โมไซฟอนที่ Gupta และ Garg ใช้ก็คล้ายกับการวิเคราะห์ของ Close เว้นแต่ Gupta และ Garg ไม่ได้คิดการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานในทางเข้า ทางออก ประตูน้ำ ข้อต่อ และข้องอต่าง ๆ ของท่อ นอกจากนี้ยังคิดค่า friction factor ในสมการ Darcy-Weisbach ให้เท่ากับ 0.035 โดยไม่คิดถึงค่า Reynolds number ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วการไหลแบบลามินาร์

Gupta และ Garg ทำการทดลองโดยใช้แผงรับรังสีแบบ galvanised corrugated ซึ่งมีพื้นที่รับแสงเท่ากับ 1 ตารางเมตร ปิดด้วยกระจกชั้นเดียว ทำการทดลองทั้งวันที่อากาศแจ่มใส และมีเมฆ เพื่อทดสอบรูปร่างจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เขาได้ปรับปรุงใหม่

ผลการทดลองปรากฏว่า อุณหภูมิของถังสะสมน้ำร้อนระหว่างเวลากลางวันสอดคล้องกับอุณหภูมิมาก ทั้งวันที่อากาศแจ่มใส และวันที่มีเมฆมาก ส่วนอุณหภูมิน้ำเข้า และออกจากแผงรับรังสีก็สอดคล้องกับอุณหภูมิเช่นกัน แต่ไม่มากเท่ากับอุณหภูมิของถังสะสมน้ำร้อน ทั้งนี้อาจจะเกิดจากความคลาดเคลื่อนในรูปจำลองที่ตั้งขึ้นมา

ผลงานของ Gupta และ Garg เป็นการปรับปรุงผลงานของ Close ซึ่งใช้ได้เฉพาะวันที่มีอากาศแจ่มใส ให้ใช้ได้กับทุกสภาพอากาศ

นอกจากนี้ยังวิเคราะห์ผลของรูปทรงของระบบที่มีต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของถังสะสมน้ำร้อน และการไหลแบบเทอร์โมไซฟอน การเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของถังที่สัมพันธ์กับตำแหน่งของแผงรับรังสี ไม่ทำให้เกิดผลที่สำคัญต่ออุณหภูมิของถัง ถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลที่มากขึ้น เมื่อถังอยู่สูงกว่าแผงรับรังสีมากขึ้น

ผลของการเปลี่ยนขนาดท่อส่งน้ำที่ต่อระหว่างถังสะสมน้ำร้อน กับแผงรับรังสี จากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 mm. เป็น 19 mm. แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิของถังสะสมน้ำร้อนไม่เปลี่ยนแปลง แต่อุณหภูมิแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออกจากแผงรับรังสีเปลี่ยนไป คือมีค่ามากขึ้น เมื่อลดขนาดท่อลง เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำช้าลง ทั้งนี้เนื่องจากท่อเล็กมีแรงเสียดทานสูงกว่าท่อใหญ่

ในการทดสอบผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างความยาว ต่อ ความกว้างของแผงรับรังสี ที่มีต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของถังสะสมน้ำร้อน ปรากฏว่า มีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อลดอัตราส่วนความยาว ต่อ ความกว้างของแผงรับรังสี นอกจากนี้ยังทำให้เกิดอัตราการไหลลดลง อุณหภูมิแตกต่างระหว่างส่วนบนสุดกับส่วนล่างสุดของถังสะสมน้ำร้อนเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ดีผลอันนี้น้อยมากในทางปฏิบัติ

ส่วนผลของการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างความสูงของถัง ต่อ ความกว้างของถัง  
ขึ้นไปเท่าตัว จะทำให้อุณหภูมิของถังเพิ่มขึ้นเพียง  $1^{\circ}\text{C}$  ส่วนอัตราการไหลจะเพิ่มขึ้น แต่  
gradient ของอุณหภูมิในถังจะเปลี่ยนเพียงเล็กน้อย

การทดลองของ Gupta และ Garg ก็ยังไม่ได้วัดอัตราการไหลของน้ำในระบบ  
เช่นกัน



Klein, Duffie และ Beckman [3] วิเคราะห์ผลของ capacitance ทางความร้อนของแผงรับรังสี ที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง โดยเลือกแผงรับรังสีที่มีการไหลของน้ำในระบบเป็นแบบ forced convection ซึ่ง transient เพียงแต่เกิดจาก thermal delay ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงไม่คิดถึงการไหลของน้ำในช่วง transient ซึ่งเกิดขึ้นในระบบที่มีการไหลแบบเทอร์โมไฮฟอน

ได้เปรียบเทียบรูปจำลอง 3 แบบ คือ

1. "Zero Capacitance" ซึ่งไม่คำนึงถึง capacitance ทางความร้อนของแผงรับรังสี
2. "One-node Capacitance" ซึ่งคิดว่าแผงรับรังสีทั้งแผ่นมีอุณหภูมิเท่ากันหมดทุกส่วน และ capacitance ทางความร้อนเป็นแบบ single node
3. "Multi-node Capacitance" ซึ่งคิดกระจกที่ปิดแผงรับรังสี และแผ่นที่-  
ออกแสงแยกกัน

ผลจากการทดลองแก้ปัญหาโดยใช้การคำนวณปรากฏว่า รูปจำลองที่แผงรับรังสีมีกระจกปิดชั้นเดียว แสดงให้เห็นว่า ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของรังสีดวงอาทิตย์ขึ้น ๆ ลง ๆ จะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนเนื่องจาก transient น้อยกว่า 0.5% ของพลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์ (useful energy gain) ถ้ากระจกอุดรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบไว้ 5% การสูญเสียความร้อนเนื่องจาก transient จะมีค่ามากที่สุดเพียง 5% ของพลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์ ที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0-10 ไมล์/ชั่วโมง แต่อย่างไรก็ดี ผลอันนี้สามารถตัดทิ้งได้ในทางปฏิบัติ และสรุปได้ว่าสามารถใช้รูปจำลอง "Zero Capacitance" ทำนายผลต่าง ๆ ของระบบได้ดีพอ ๆ กับรูปจำลอง "One-node Capacitance" แต่มีการคำนวณน้อยกว่า เมื่อใช้ข้อมูลอุณหภูมิตามวิทยาสถาบันที่กักขังชั่วโมงละครั้ง

การทดลองนี้ ไม่ได้กล่าวถึงการวัดอัตราการไหลเช่นเดียวกัน

Ong [4] ใช้วิธี finite-difference ในการหาค่าคุณสมบัติทางความร้อนของระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ ที่มีการไหลแบบเทอร์โมไฮพอน รูปจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Ong คล้ายกับของ Close และ Gupta กับ Garg มาก เพียงแต่เพิ่มส่วนที่สำคัญบางอย่างเข้าไป คือ fouling factor (เนื่องจากความสกปรก) ที่ผิวในของท่อ-สำหรับสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนในแผงรับรังสี วิธีของ Ong มีประโยชน์มากที่ใช้รังสีดวงอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมจริง ๆ แทนการใช้การประมาณด้วย Fourier Series แบบของ Gupta และ Garg

ในการคำนวณค่าการสูญเสียจากการเสียนานสำหรับท่อของแผงรับรังสีและท่อภายนอก ใช้สูตรของ Darcy-Weisbach สำหรับการไหลแบบลามินาร์ ในการวิเคราะห์การสูญเสียเนื่องจาก ข้อต่อ ข้อต่อแบบที และข้อจำกัดอื่น ๆ ด้วย ซึ่ง Gupta และ Garg ไม่ได้คำนึงถึง

ผลของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำ เช่น สัมประสิทธิ์ของการขยายตัว ความหนืด ความหนาแน่น สภาพการนำความร้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ก็ได้รับการพิจารณาในการวิเคราะห์ของ Ong ซึ่งสิ่งเหล่านี้ Close และ Gupta กับ Garg ไม่ได้คำนึงถึง

Ong ได้ทำการทดลอง โดยใช้แผงรับรังสีซึ่งมีพื้นที่รับแสงเท่ากับ 18 ตารางฟุต เอียงเป็นมุม  $7.5^{\circ}$  หันหน้าไปทางทิศใต้ ใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 1 นิ้ว หุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน ต่อระหว่างแผงรับรังสีและถังสะสมน้ำร้อนขนาด 28 แกลลอนที่ทำด้วยทองแดง

Ong รัศมีการไหลของน้ำในระบบได้โดยการฉีดเข้าไปในท่อแก้ว ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบ แล้วจับเวลา (ด้วยนาฬิกาจับเวลา) เมื่อสีผ่านจุด 2 จุด ก็จะได้ความเร็ว (โดยประมาณ) ของน้ำในท่อ แล้วนำมาหาค่าอัตราการไหลของมวลของน้ำได้ ซึ่งเป็นรายงานแรกที่มีการรัศมีการไหลของน้ำในระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ ที่มีการไหลแบบเทอร์โมไฮพอน

015547

จากผลการทดลองที่ได้ทำให้บ่งชี้ชัดได้ว่า อุณหภูมิเฉลี่ยของแผงรับรังสี (mean plate temperature) อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในถังสะสมน้ำร้อน (Storage tank bulk mean temperature) และอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในท่อของแผงรับรังสี (collector tube water mean temperature) มีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งขัดกับข้อสมมุติของ Ong เอง และของ Close และ Gupta กับ Garg ด้วย

อัตราการไหลของมวลของน้ำ และประสิทธิภาพทางความร้อนที่ได้จากการทดลอง ให้ผลค่อนข้างตรงกับทฤษฎี ประสิทธิภาพชั่วขณะ (instantaneous efficiency) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 76% และประสิทธิภาพของระบบ (bulk efficiency) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 62% เมื่อรังสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วงที่มีค่าสูงสุด และลดลงเหลือ 52% ในตอนเย็น

อีกสิ่งหนึ่งซึ่งผลที่ทดลองได้ขัดกับข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ การที่สมมุติให้การกระจายของอุณหภูมิของน้ำในถังสะสมน้ำร้อนเป็นแบบเชิงเส้น แต่ผลการทดลองที่ได้ไม่เป็นแบบเชิงเส้น มีค่า slope สูงบริเวณก้นถัง

การทดลองของ Ong นี้ แสดงให้เห็นว่า ข้อสมมุติที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความไม่ละเอียด แต่อย่างไรก็ดี ผลที่ได้จากทฤษฎีและการทดลอง พอดีไปด้วยกันได้ สำหรับการใช้งานในทางปฏิบัติส่วนใหญ่

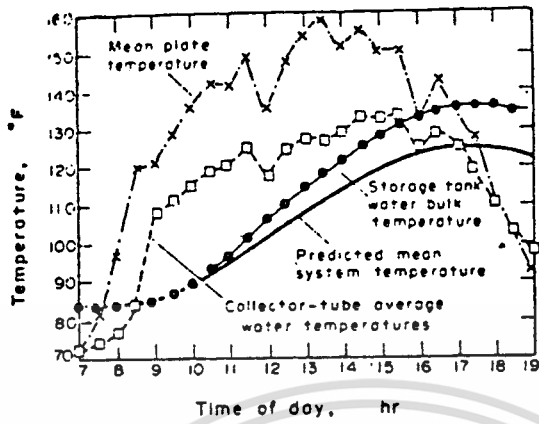


Fig. 7. Mean system temperature.

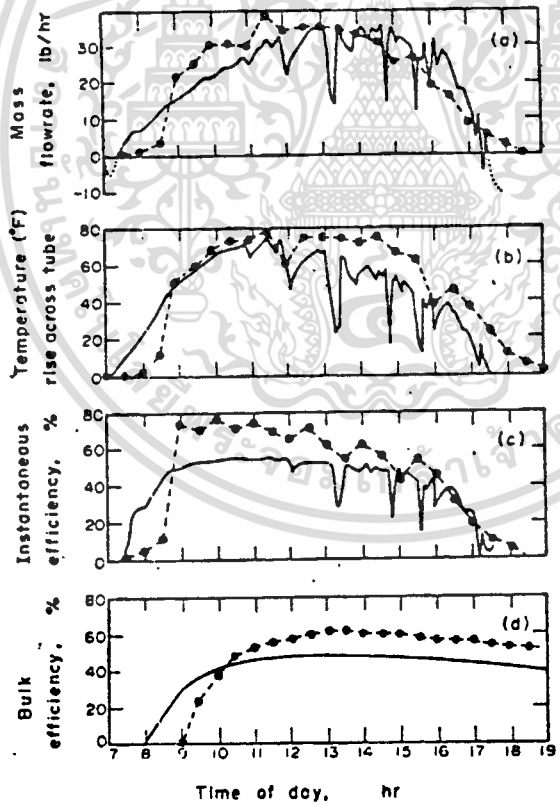


Fig. 8. Comparison between experimental results and theoretical prediction.—prediction,--- experiment.

Ong [5] ในรายงานฉบับที่ 2 Ong ได้ปรับปรุงรูปแบบจำลองทางทฤษฎีใหม่เพื่อที่จะใช้ทำนาย ปรากฏการณ์ทางความร้อน (thermal performance) ของการไหลวนแบบธรรมชาติ (natural convection) ในระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ รูปจำลองนี้พิจารณากระบวนการทั้งหมดโดยการแบ่งออกเป็น ส่วน ๆ แต่ละส่วนจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากัน โดยพิจารณาสมการสมดุลพลังงานของแต่ละส่วน แล้วเขียนสมการ finite-difference ก็สามารถหาอุณหภูมิเฉลี่ยของแต่ละส่วนได้ ส่วนอัตราการไหลของมวลของน้ำในระบบสามารถคำนวณหาได้จากการกระจายของอุณหภูมิของทั้งระบบ

ในการวิเคราะห์ thermosyphon head ก็เหมือนกับของ Close ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในถัง (bulk mean temperature) การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานก็คำนวณจากสูตรการหาแรงเสียดทานของ Darcy สำหรับการไหลแบบลามินาร์ นอกจากนี้ยังคำนึงถึงการสูญเสียเนื่องจากทางเข้า ทางออก ประตุน้ำ ข้องอ ข้อต่อแบบที และอื่น ๆ การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำต่ออุณหภูมิ เช่น ความหนืด ความหนาแน่น สภาพการนำความร้อน ในการวิเคราะห์ด้วย

Ong ได้ทำการทดลองโดยใช้แผงรับรังสีที่มีพื้นที่รับแสง 16.5 ตารางฟุต เอียงเป็นมุม  $7.5^\circ$  หันหน้าไปทางทิศใต้ มีถังสะสมน้ำร้อนขนาด 28 แกลลอน

ในการทดลองก็ทำการวัดเช่นเดียวกับการทดลองครั้งก่อน โดยทำการวัดทุก ๆ ครึ่งชั่วโมง ตั้งแต่ 6.00 น. จนถึง 19.00 น. วัดอุณหภูมิเฉลี่ยของถังสะสมน้ำร้อน อัตราการไหลของมวลของน้ำ ประสิทธิภาพของระบบ ที่ค่าความสูงของถังที่สูงกว่าแผงรับรังสีหลายค่า เพื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎี และพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของถังสะสมน้ำร้อนสอดคล้องกับทฤษฎีอย่างมาก แต่อัตราการไหลของมวลของน้ำ และประสิทธิภาพของระบบ ไม่ค่อยตรงกับทฤษฎี ซึ่งในบางขณะจะผิดกันถึง 100% โดยเฉพาะในช่วงเช้าและเย็น

Ong ได้เสนอแนะถึงองค์ประกอบที่ทำให้เกิดความผิดพลาดมากในตอนเช้าและ

1. ค่า capacitance ทางความร้อนของกระจก ฉนวน และอากาศที่อยู่ภายในแผงรับ-รังสี ในการวิเคราะห์ไม่ได้คิดถึงสิ่งเหล่านี้
2. ผลของมุมตกกระทบของรังสีดวงอาทิตย์ ที่มีต่อค่า transmittivity ของกระจก
3. เมื่อเริ่มต้นการทดลอง ก็คิดว่า อัตราการไหลของน้ำ เท่ากับศูนย์ ถึงแม้ว่าขณะนั้น จะเกิดมีการไหลวนแล้ว



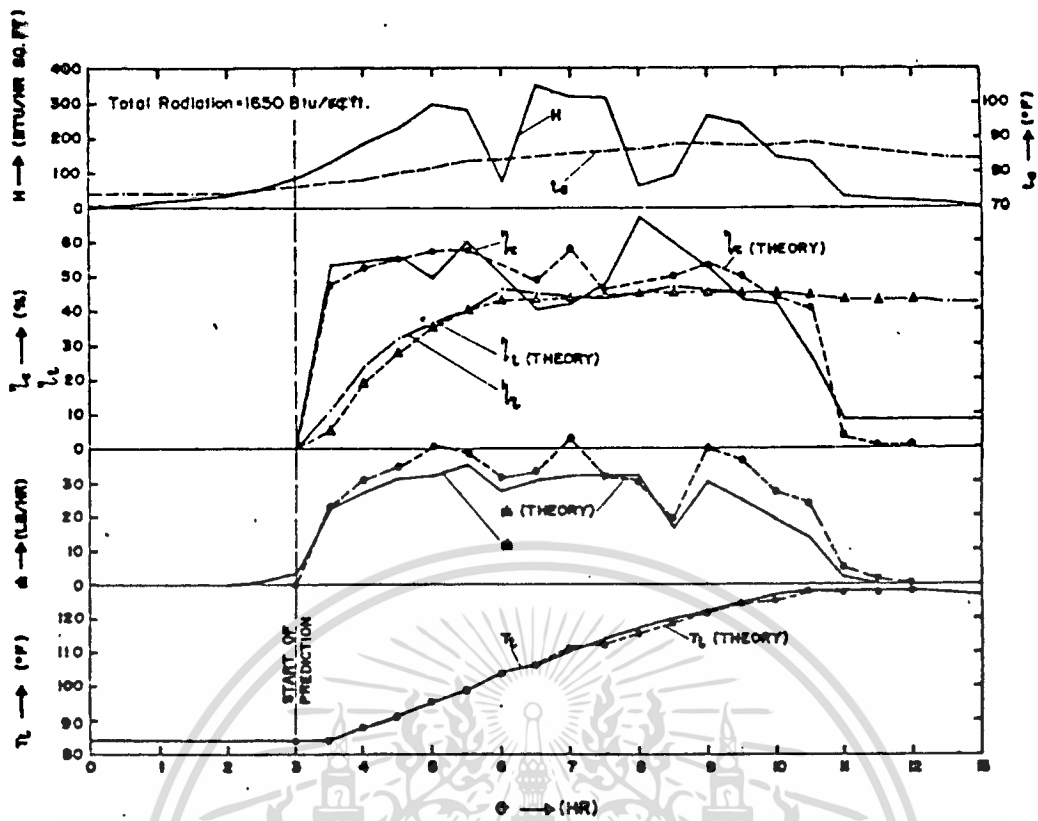


Fig. 4. Performance figures from test run A2.

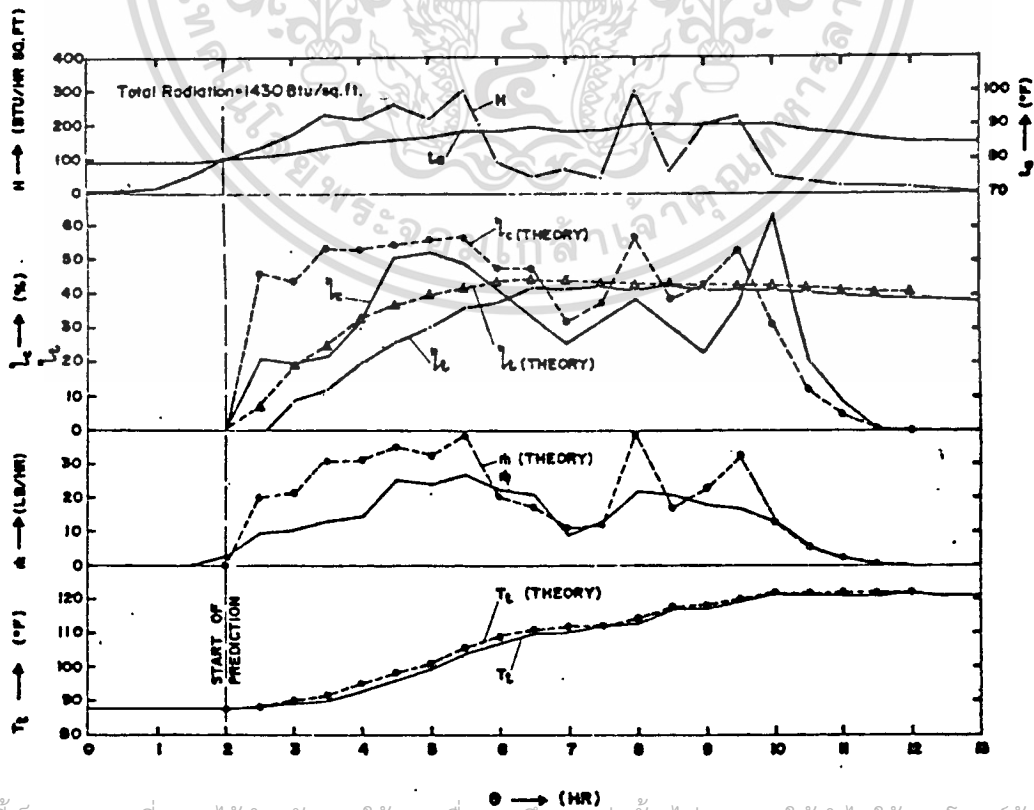


Fig. 5. Performance figures from test run C3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

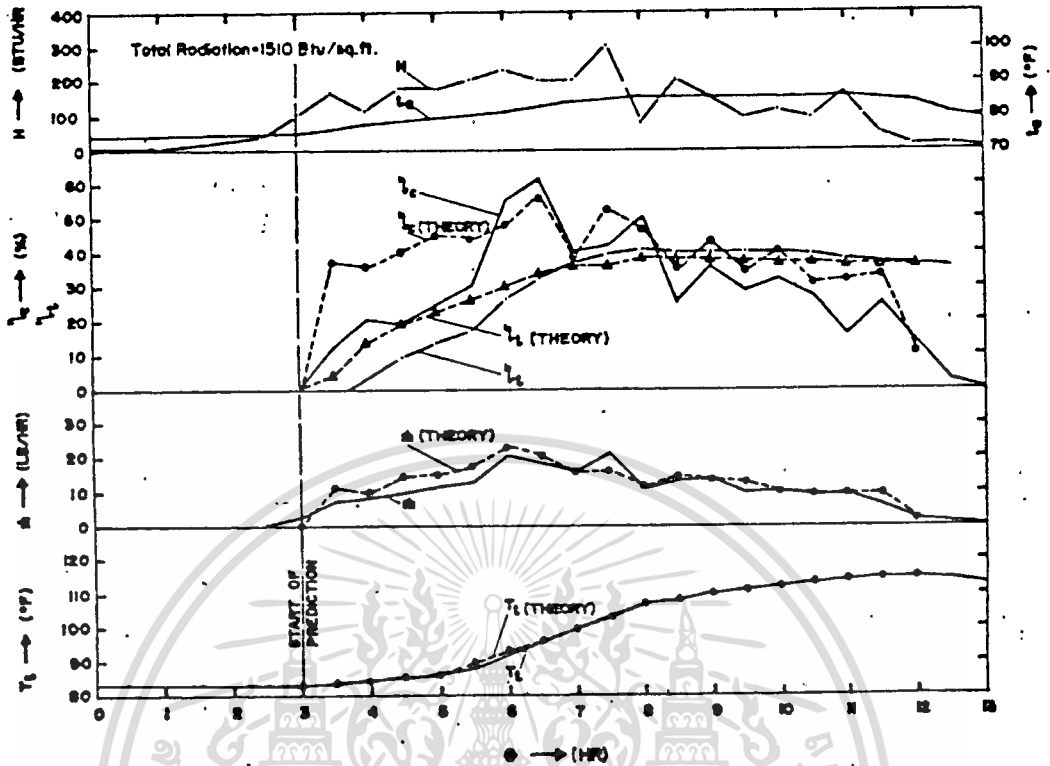


Fig. 6. Performance figures from test run E2.

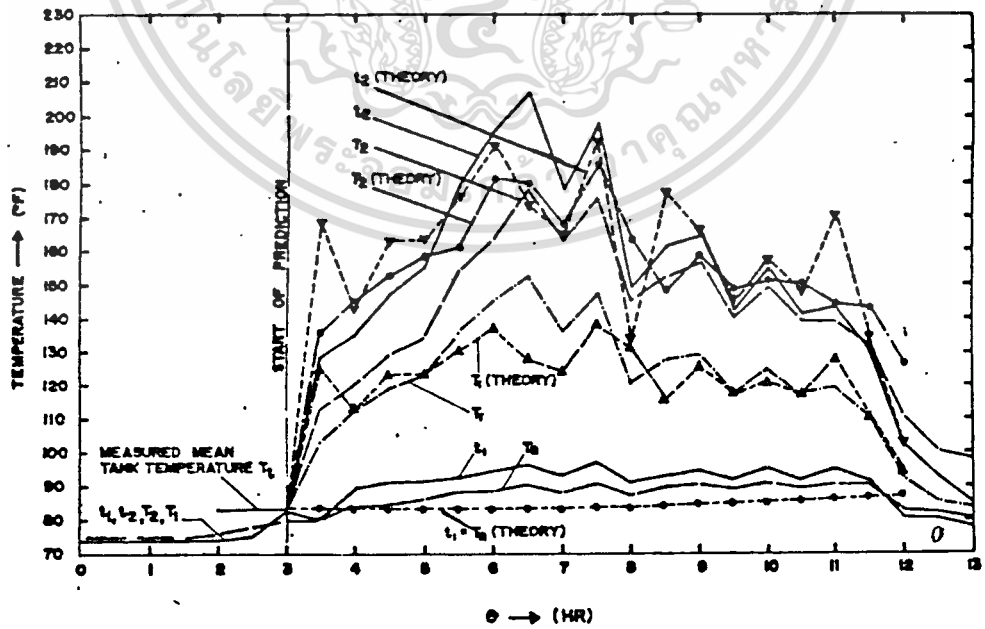


Fig. 7. Performance figures from test run E2.

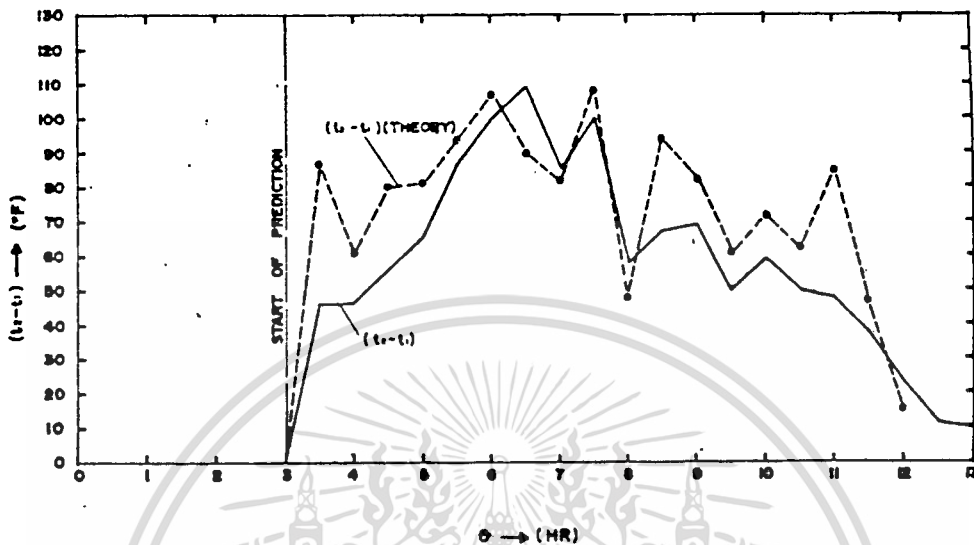


Fig. 8. Performance figures from test run E2.

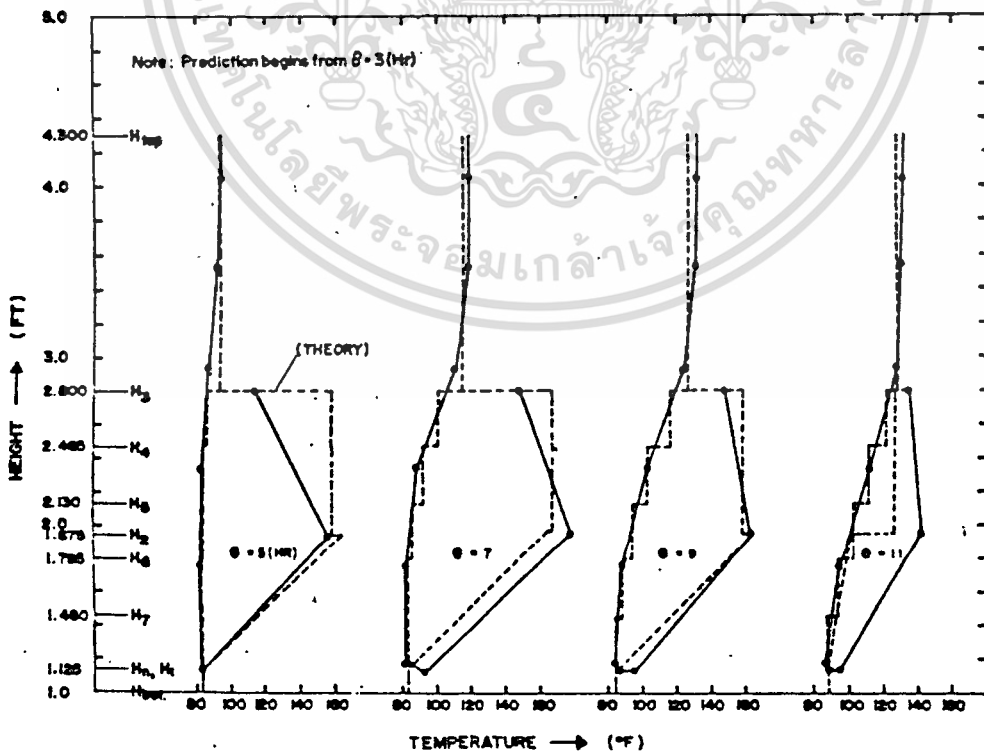


Fig. 9. Temperature-height distribution results from test run E2.

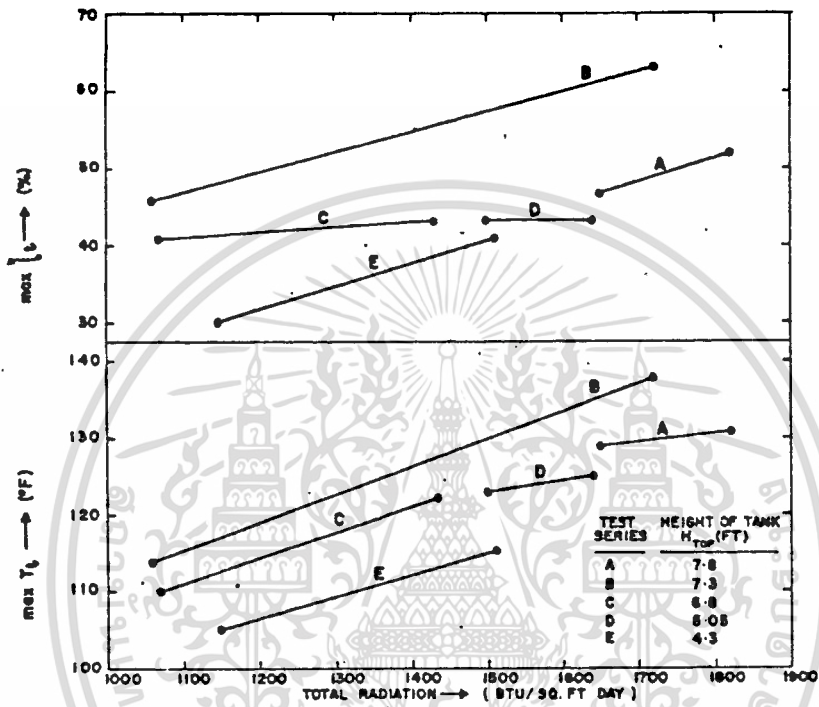


Fig. 10. Variation of maximum values of system efficiency and mean tank temperature with relative height of storage tank above absorber unit.

Zvirin, Shitzer และ Grossman [6] ได้ใช้รูปจำลองทางทฤษฎีสำหรับ  
แผงรับรังสี โดยเปรียบเทียบผลระหว่างการใช้รูปจำลองของการกระจายของอุณหภูมิของ  
น้ำในถัง และน้ำในแผงรับรังสีเป็นแบบเชิงเส้น และไม่เป็นเชิงเส้น ทั้งนี้โดยสมมุติว่า การ  
ไหลของน้ำเป็นแบบ fully developed laminar และความหนาแน่นของน้ำ หาได้จาก  
อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในวงของการไหล และท่อของแผงรับรังสี ผลการคำนวณ แสดงให้เห็น  
ว่า สำหรับระบบทำน้ำร้อนตัวอย่างแบบนี้ การใช้รูปจำลองแบบเชิงเส้น ก็ให้ผลดีเพียงพอ  
โดยมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการใช้รูปจำลองแบบไม่เป็นเชิงเส้น



Shitzer, Kalamanoviz, Zvirin และ Grossman [7] ได้ทำการทดลอง โดยใช้แผงรับรังสีแบบแผ่นราบ 2 แผง ซึ่งทาสีดำ มีพื้นที่รับแสง 3 ตารางเมตร มีถังสะสมน้ำร้อนขนาด 140 ลิตร ระหว่างการทดลองไม่มีการถ่ายน้ำออกจากระบบ มีการจดค่าต่าง ๆ ในการวัดทุก ๆ 10 นาที ทำการวัดอุณหภูมิของแผ่นดูดแสงของแผงรับรังสีอย่างละเอียด โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลติดข้างใต้แผ่นดูดแสง ตามจุดต่าง ๆ ตามแนวยาว และระหว่างท่อ riser เพื่อดู profile ของอุณหภูมิตั้งแต่แผ่นดูดแสงระหว่างท่อ วัดอุณหภูมิของท่อในแผงรับรังสี วัดอุณหภูมิของถังสะสมน้ำร้อน นอกจากนี้ยังวัดอุณหภูมิของน้ำในท่อ riser ของแผงรับรังสีจริง ๆ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลจุ่มเข้าไป นับเป็นรายงานแรกที่มีการวัดอุณหภูมิของน้ำในท่อของแผงรับรังสีจริง ๆ ก่อนหน้านี้ Ong [4] วัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิที่ผิวท่อ riser แล้วคิดว่าอุณหภูมิของน้ำในท่อ ณ จุดนั้น มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ผิวท่อที่วัดได้

ในการวัดอัตราการไหลของน้ำ ใช้ thermal flowmeter ซึ่งอ้างว่าทำให้เกิดความต้านทานไฮดรอลิคน้อยกว่า 1 mm. ของน้ำ ที่ค่า Reynolds number เท่ากับ 1100

ผลที่ทดลองได้ยืนยันผลการคำนวณที่ปรากฏในรายงานฉบับก่อน คือ การกระจายของอุณหภูมิของน้ำในแผงรับรังสี และถังสะสมน้ำร้อน สามารถสมมุติให้เป็นแบบเชิงเส้นได้ และในตอนเย็นควรจะหยุดการไหลของน้ำ เมื่อการสูญเสียความร้อนมีค่ามากกว่า ความร้อนที่ได้รับจากดวงอาทิตย์

จากผลการทดลองพบว่าอัตราการไหลของน้ำ จะเปลี่ยนแปลงตามรังสีดวงอาทิตย์ และจะมีค่ามากที่สุดประมาณ 950 cc/min ซึ่งการไหลจะเป็นแบบลามินาร์ตลอดทั้งวัน เว้นแต่ในตอนเที่ยงของบางวันที่แดดจัด อาจจะอยู่ในช่วง transition ระหว่างลามินาร์และเทอร์บูเลนซ์ จากอัตราการไหลขนาดนี้ซึ่งใช้ท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในประมาณ 1.8 ซม. จะได้ความเร็วของน้ำที่ไหลอยู่ในช่วง 0-6.3 cm/sec

ค่าอัตราการไหลของมวลของน้ำที่มากที่สุดที่วัดได้นี้ จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณอยู่ 33% ทั้งนี้มีผลมาจาก dynamic effect และความไม่แน่นอนในการประเมินค่าของ parameters ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของแผงรับรังสี นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นอัตราการไหลเปลี่ยนแปลงขึ้น ๆ ลง ๆ ถึงแม้ว่าตัวประกอบ (factor) อื่น ๆ มีค่าคงที่ และให้เหตุผลว่าอาจจะเกิดจากเครื่องมือวัดไม่ละเอียดพอ หรือ อาจเกิดจาก hydrodynamic instability ของระบบทำน้ำร้อนแบบนี้



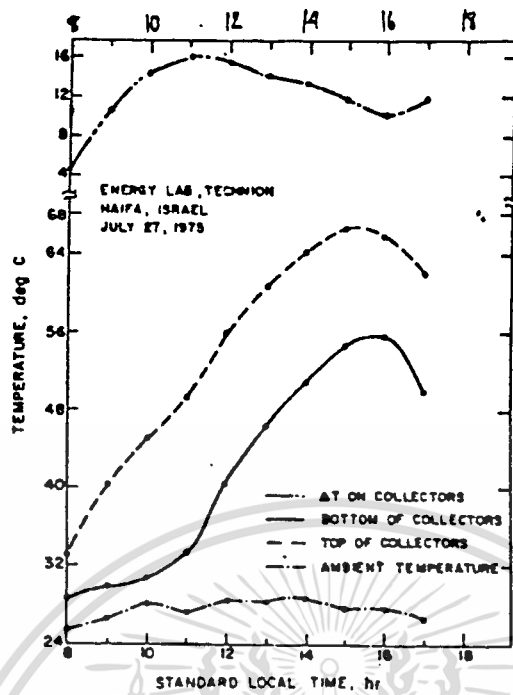


Fig. 2. Daily variations of collectors inlet, outlet and difference temperatures and ambient temperature variations.

Experiments with a flat plate solar water heating system in thermosiphonic flow

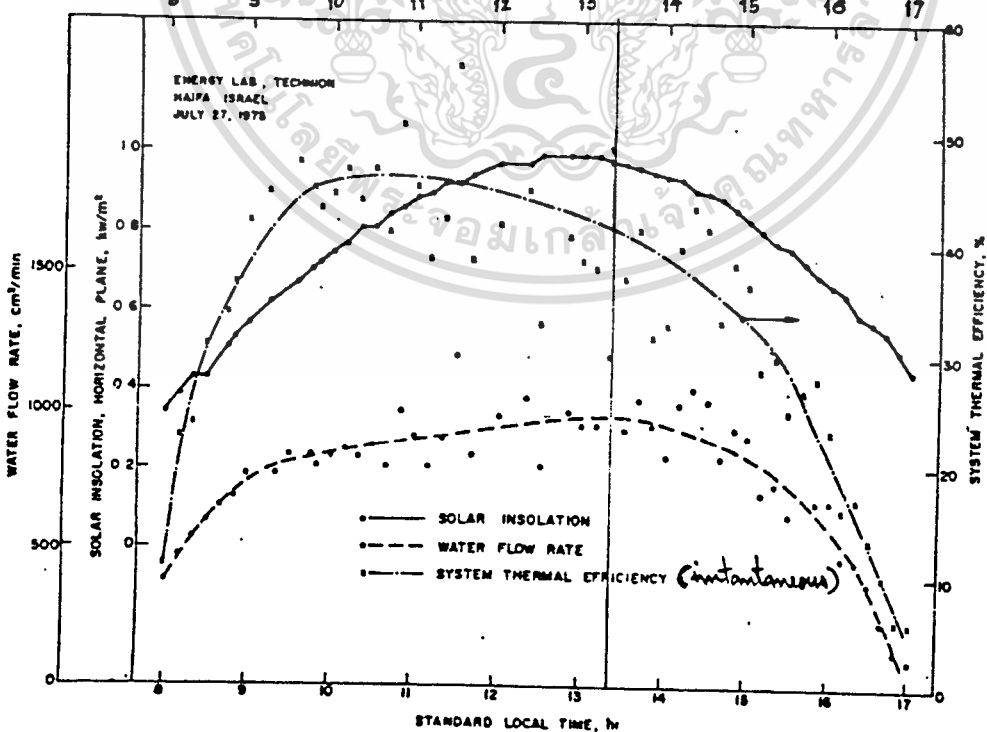


Fig. 8. Daily temperature variations of solar insolation, water flow rate and system instantaneous efficiency.

Ho [8] ใช้ Laser Doppler Anemometer ในการวัดความเร็วของน้ำ ในแผงรับรังสีแบบแผ่นราบ โดยที่เครื่องมือนี้ไม่รบกวนการไหลของน้ำเลย และสามารถวัดความเร็วของน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในท่อได้ด้วย

ในการทดลอง Ho ได้ยึดถือการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ทางความร้อนของระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์แบบนี้ โดยใช้รูปจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Close และได้ทดลองวัดอัตราการไหลของน้ำ เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีในสภาพอากาศที่แจ่มใส และไม่มีการถ่ายน้ำออกจากระบบระหว่างการทดลอง นอกจากนี้ยังทดลองดูผลของการตอบสนองแบบ transient เมื่อมีการเปลี่ยนรังสีดวงอาทิตย์อย่างทันทีทันใด (step change) แต่ไม่ได้วิเคราะห์ทางทฤษฎีในกรณีนี้

ผลการทดลองของ Ho สรุปได้ดังนี้

1. Ho มีความเห็นว่า Laser Doppler Anemometer เป็นเครื่องมือราคาถูกเมื่อเทียบกับ Laser Anemometer ที่มีขายอยู่ทั่วไป ใช้งานได้ดี ความเที่ยงตรงสูง (โดยการทดสอบแล้วปรากฏว่าผิดพลาดไม่เกิน 2%) นอกจากนี้ยังสามารถติดตั้งให้ทำการวัดอย่างสะดวกได้ตลอดทั้งวัน โดยมีการเก็บข้อมูลอย่างอัตโนมัติทุก ๆ สภาพอากาศด้วย
2. ในการใช้ทฤษฎีของ Close ประเมินค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบเมื่ออากาศแจ่มใส และไม่มีการถ่ายน้ำออกจากระบบ ผลที่ได้มีความผิดพลาดเล็กน้อย ถึงแม้ว่าในช่วงเช้าและเย็น ผลของการวัดพลังงานความร้อนที่แผงรับรังสีรับได้ จะให้ค่าต่ำกว่าทฤษฎี และในช่วงเวลากลางวันให้ผลสูงกว่าทฤษฎี ซึ่งมีความผิดพลาดมากที่สุดเพียง 10% Ho ได้อธิบายผลอันนี้ว่า เกิดขึ้นจากการที่ช่วงเช้าและเย็น แสงอาทิตย์ตกกระทบกับแผงรับรังสีเป็นมุมกว้างเกินไป ทำให้รังสีดวงอาทิตย์บางส่วนสะท้อนกระจกกลับออกไป ถ้าคิดผลอันนี้ ก็คงจะทำให้ผลการทำนายทางทฤษฎีถูกต้องยิ่งขึ้น แต่ Ho ยังไม่ได้กล่าวถึงสาเหตุของความผิดพลาดในช่วงเวลากลางวัน
3. ในการประเมินอัตราการไหลของน้ำแบบเทอร์โมไซฟอน ให้ผลต่ำกว่าที่ได้จากการทดลอง ทั้งนี้เนื่องมาจาก การสมมุติว่า อุณหภูมิของน้ำร้อนที่เข้าไปในถังสะสมน้ำร้อนมีอุณหภูมิ

เท่ากับน้ำภายในถังที่ระดับนั้น ในการทดลองพบว่า อุณหภูมิของน้ำร้อนที่เข้าไปในถังจะสูงกว่าขนาดของอุณหภูมิที่แตกต่างกันนี้วิเคราะห์ได้ยาก แต่อย่างไรก็ดี จากรูปจำลองที่ใช้ก็ให้ค่าอัตราการไหลที่ตีพอ ภายใต้อุณหภูมิอากาศแจ่มใส และไม่มีการถ่ายน้ำออกจากระบบ

4. จากการวัดผลตอบสนอง transient พบว่าค่า capacitance ของระบบทำให้ปรากฏการณ์ทางความร้อน ของระบบต่ำลง เมื่อมีการเปลี่ยนของรังสีดวงอาทิตย์อย่างทันทีทันใด และยังพบว่าตำแหน่งของท่อส่งน้ำร้อนจากแผงรับรังสีไปยังถังสะสมน้ำร้อน มีผลอย่างสำคัญต่อคุณสมบัติการตอบสนองของระบบ ผลตอบสนอง transient ในกรณีนี้จะมีเวลาหน่วง (time delay) ซึ่งเกิดจากการสร้าง thermosyphon head ในท่อส่วนที่อยู่ในแนวนอนของท่อส่งน้ำร้อน

5. ผลของการวัดผลตอบสนอง transient แสดงให้เห็นว่า

5.1 เพื่อให้ผลตอบสนอง transient ดี คือ เป็นไปอย่างรวดเร็ว ต้องให้ท่อส่งน้ำร้อนสั้นและตั้งชันที่สุด

5.2 พลังงานความร้อนที่ได้รับในช่วง 10 นาที เมื่อมีการเปลี่ยนของรังสีดวงอาทิตย์อย่างทันทีทันใด มีค่าเป็น 86% ของค่าสูงสุด-ของพลังงานความร้อนที่รับได้ เมื่อเวลาตอบสนองมีค่าน้อยที่สุด

5.3 ถ้ามีการเปลี่ยนของรังสีดวงอาทิตย์อย่างทันทีทันใดน้อยกว่า 20 นาทีต่อครั้ง เปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อนที่รับได้จะลดลง ในทำนองกลับกันถ้ามากกว่า 20 นาทีต่อครั้ง เปอร์เซ็นต์ก็จะเพิ่มขึ้น

5.4 ท่อส่งน้ำร้อนส่วนที่อยู่ในแนวราบทำให้ผลตอบสนองช้า (คือ เกิดการไหลช้าไป) และอุณหภูมิเกิด overshoot ซึ่งจะเป็นผลให้เกิดการสูญเสียความร้อนมากที่แผงรับรังสี ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง

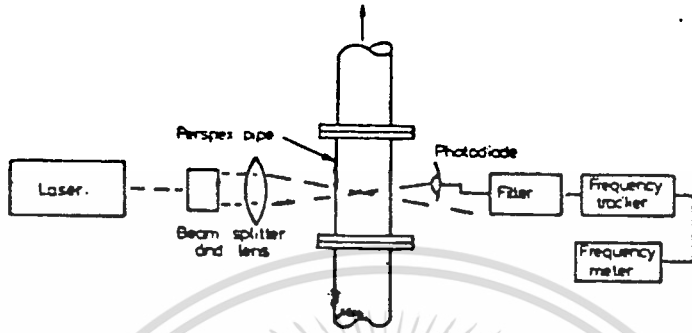


Fig. 4. Laser anemometer.

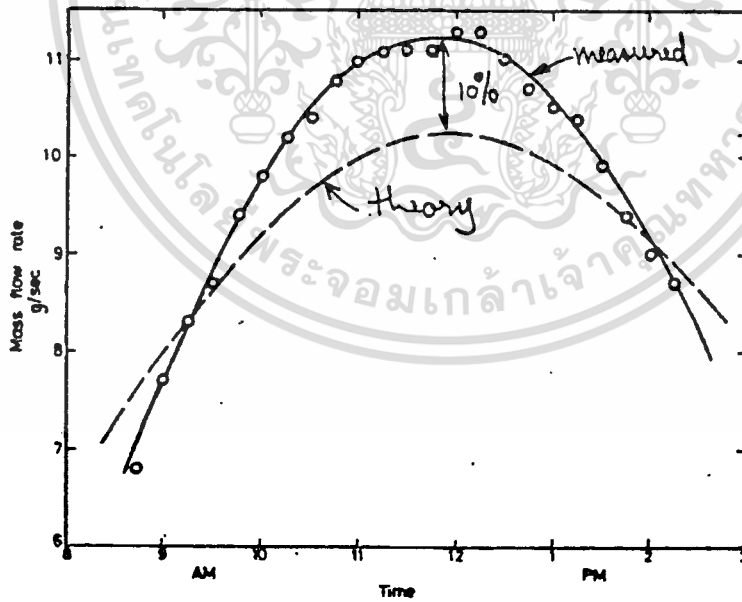


Fig. 2. Thermosyphon flow rate.

Ranatunga [9], Morrison และ Ranatunga [10, 11] ได้ทำการทดลอง ต่อจาก Ho โดยใช้ Laser Doppler Anemometer วัดอัตราการไหลของน้ำ เช่นเดียวกัน และมีการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางทฤษฎีเปรียบเทียบกับผลที่วัดได้จริง ๆ ทางปฏิบัติ ในการทดลองไม่ได้วัดกับแผงรับรังสีที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์จริง ๆ เพราะควบคุมสภาพแวดล้อม (คือ อุณหภูมิ รังสีดวงอาทิตย์ ความเร็วลม ความชื้น) ได้ยาก และทำการทดลองซ้ำในสภาพแวดล้อม เดียวกันไม่ได้ จึงเปลี่ยนมาทำการทดลองในห้องปฏิบัติการแทน ซึ่งสามารถควบคุมสภาพแวดล้อม ที่ต้องการได้ และใช้การให้ความร้อนแก่น้ำด้วย heater แทนดวงอาทิตย์

จากการเปรียบเทียบการวัดอัตราการไหลของมวลของน้ำกับทฤษฎี ซึ่งได้ยึดถือ กันมาจาก Close ปรากฏว่าแตกต่างกันทั้งค่า transient และ steady state ซึ่ง อาจจะมีมากถึง 50% ที่ค่า Reynolds Number มากกว่า 1,200 โดยในช่วงที่ค่า Reynolds Number มีค่าสูง (ประมาณ 400 ขึ้นไปจนถึง 1,200) ค่าที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่าที่วัดได้ ส่วนในช่วงที่ Reynolds Number มีค่าต่ำ (ต่ำกว่า 400 โดยประมาณ) ค่าที่คำนวณได้ มีค่าน้อยกว่าค่าที่วัดได้

Ranatunga จึงได้ปรับปรุงสูตรทางทฤษฎีใหม่ เพื่อให้การทำนายผลการวัดอัตรา- การไหลของมวลของน้ำถูกต้องยิ่งขึ้น โดยคำนึงถึงการเสียดทาน เนื่องจากการไหลที่กำลังก่อตัว (developing flow) การเสียดทานตรงทางเข้า ทางออกของท่อ และผลของ profile ของอุณหภูมิในท่อ riser และบริเวณพื้นที่หน้าตัดของท่อ riser ที่มีต่อ thermosyphon head ผลที่ได้ทำให้การทำนายในช่วงค่า Reynolds Number ประมาณ 400-1,200 มีค่าเกือบ ถูกต้อง แต่ในช่วงค่าต่ำกว่า 400 (โดยประมาณ) ใช้ไม่ได้ผล และยังปรับปรุงทฤษฎีไม่ได้

แต่ผลของการปรับปรุงทางทฤษฎีใหม่นี้ ไม่มีผลต่อระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ ที่มีถังสะสมน้ำร้อนอยู่สูงกว่าแผงรับรังสีมากกว่า  $(\geq 1$  ฟุต) แต่จะมีผลอย่างสำคัญต่อ ระบบที่ถังสะสมน้ำร้อนอยู่ใกล้ ๆ กับแผงรับรังสี

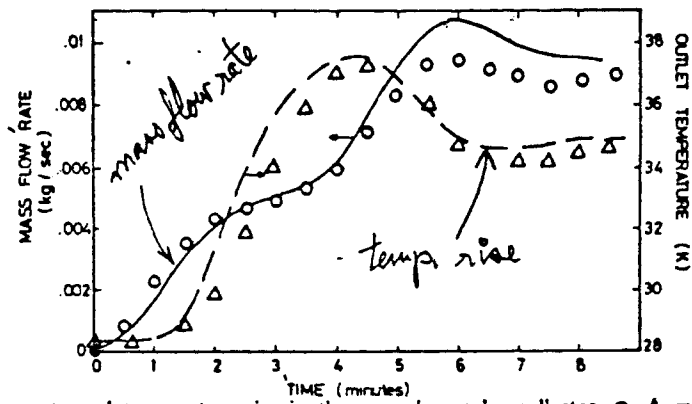


Fig. 3. Mass flow rate and temperature rise in thermosyphon solar collector. O,  $\Delta$  measurements; — predictions.

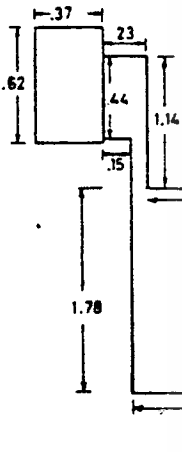


Fig. 4. Electrically heated test circuit.

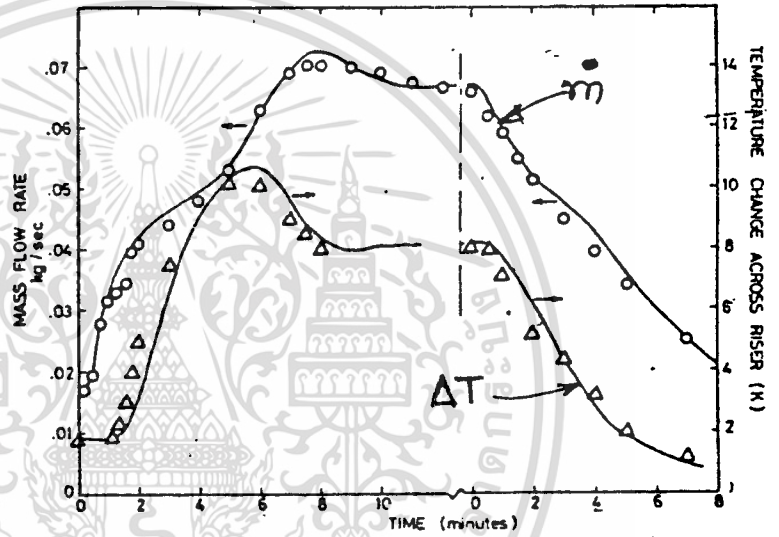
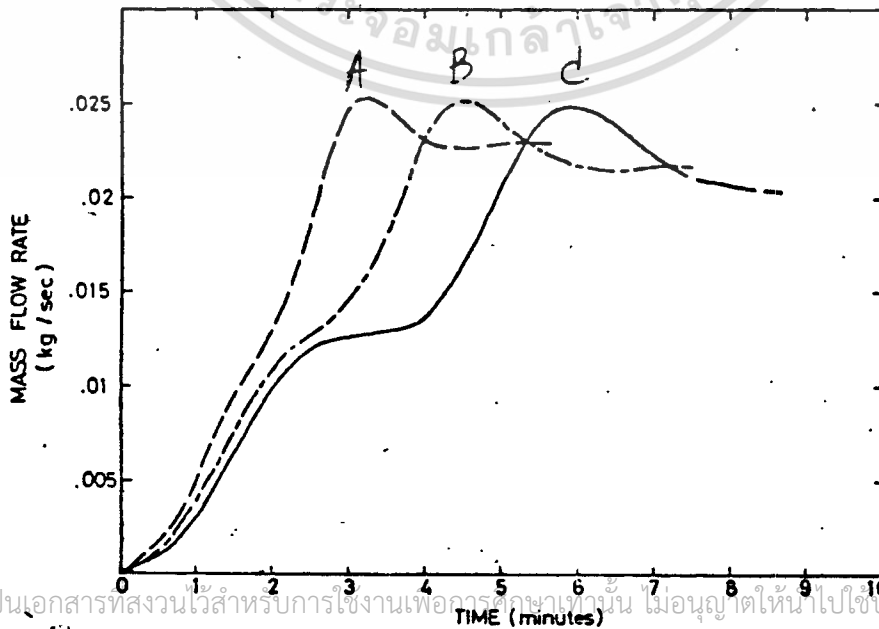


Fig. 5. Mass flow rate and temperature rise in laboratory thermosyphon model. O,  $\Delta$  measurements; — predictions.



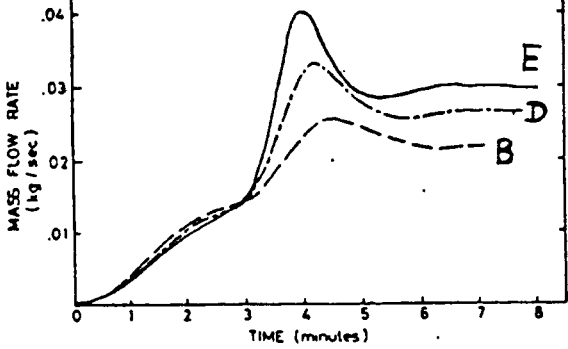


Fig. 8. Transient thermosyphon flow for various tank heights.

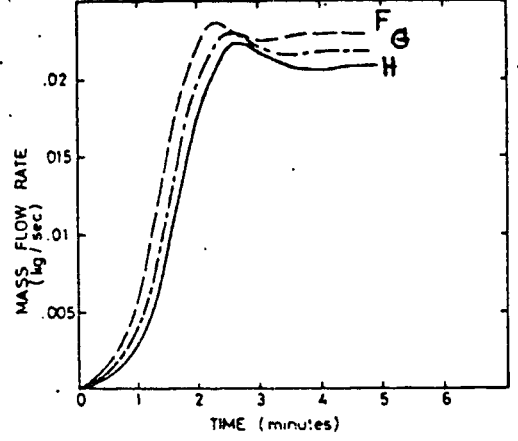


Fig. 9. Transient thermosyphon flow for various return pipe lengths and configuration B.

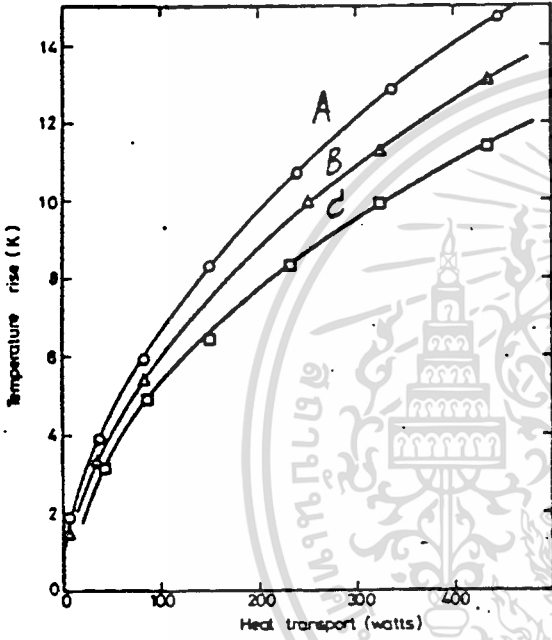


Fig. 5. Measurements of temperature change in the riser: O, Δ, □, experiments A, B, C.

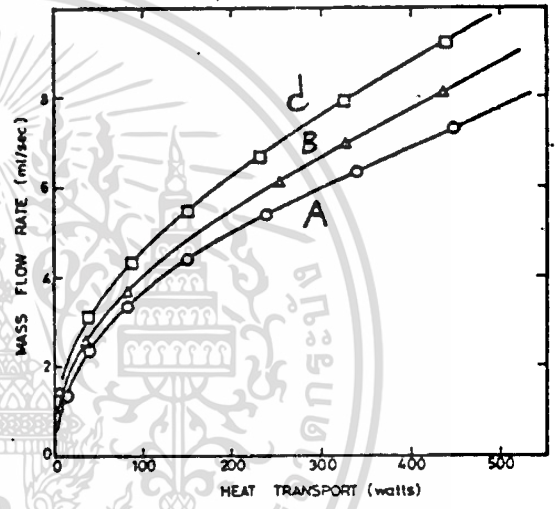


Fig. 6. Measurement of thermosyphon mass flow rate: O, Δ, □, experiments A, B, C.

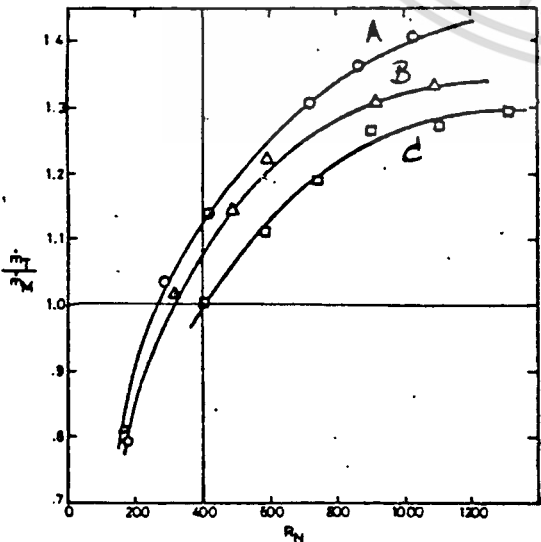


Fig. 7. Comparison of predicted mass flow rate ( $\dot{m}_p$ ) based on eqn. (11) and measured mass flow rate ( $\dot{m}_m$ ): O, Δ, □, experiments A, B, C.

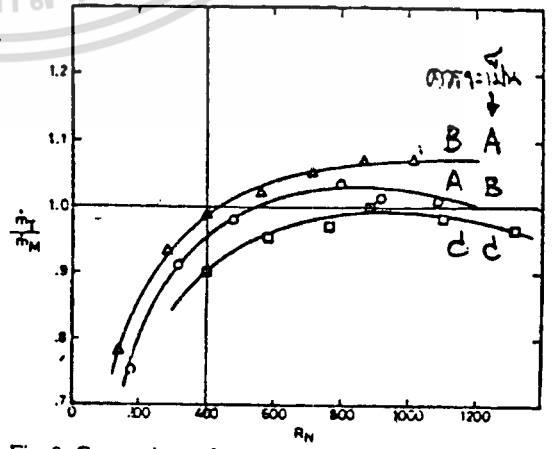
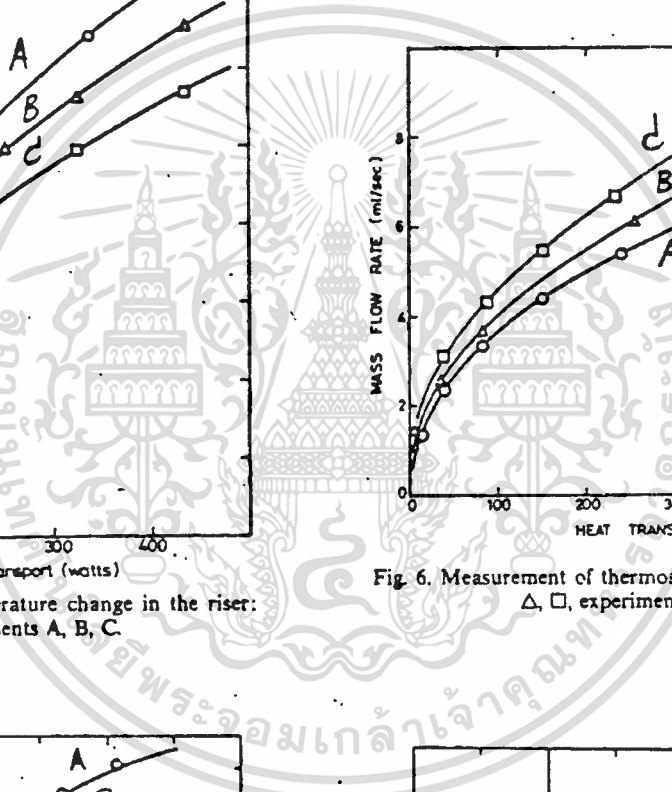


Fig. 8. Comparison of predicted mass flow rate ( $\dot{m}_T$ ) based on eqn. (12) and developing friction correction and measured mass flow rate ( $\dot{m}_M$ ): O, Δ, □, experiments A, B, C.



เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไปว่ากรรณิดาทางสืบ ลักขังห้ากรรณิดาให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวโดยสรุป ตั้งแต่มีการศึกษาเรื่องการไหลแบบเทอร์โมไซฟอนเป็นต้นมา มีการวัดอัตราการไหลของมวลของน้ำ โดยใช้เครื่องมือ 3 แบบ คือ

1. Ong [4] ใช้การฉีดสี แล้วจับเวลาเมื่อสีผ่านระยะทางที่กำหนดไว้ แบบนี้ใช้ง่าย สะดวก แต่ให้ผลไม่ถูกต้องนัก ค่าที่ได้เป็นค่าประมาณเท่านั้น เพราะมีการแพร่ของสีทั้งในทิศทาง และตามการไหลของน้ำ

2. Shitzer, et. al. [7] ใช้ thermal flowmeter ซึ่งให้ผลดีพอควร แต่มีข้อเสีย คือ ทั้ง sensor และ heater จุ่มอยู่ในน้ำทำให้เกิดเสียหาย เนื่องจากสนิมและ สึกกร่อนได้ง่าย (โดยเฉพาะ heater) นอกจากนี้อาจจะเกิดอันตรายจากไฟฟ้ารั่ว เข้าสู่ ระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ได้ หรือถ้าใช้ thermal flowmeter ที่ทั้ง sensor และ heater ไม่ได้จุ่มอยู่ในน้ำ ก็มีความยุ่งยากเกี่ยวกับสูตรทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณ และการปรับเครื่องมือก่อนการทำการวัด [25-26]

3. Ho [8] ใช้ Laser Doppler Anemometer ในการวัด ซึ่งให้ผลดีมาก แต่มี ราคาแพง เพราะเครื่องหนึ่งราคาประมาณ 200,000 บาท เป็นอย่างต่ำ

นอกจากนี้ Toda และ Shinoda [12] ใช้ ultrasonic flowmeter วัด ความเร็วของน้ำ ที่มีความเร็วอยู่ในช่วงประมาณ 8-26 cm/sec ซึ่งให้ความถูกต้องสูง แต่ การไหลแบบเทอร์โมไซฟอน จะมีความเร็วในช่วง 0-10 cm/sec (โดยประมาณ) ดังนั้น ความเร็วในช่วง 0-8 cm/sec จึงใช้ ultrasonic flowmeter แบบนี้วัดไม่ได้

### 1.3 วัดอุณหภูมิ

สร้างและทดสอบ เครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำในระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ ที่มีการไหลของน้ำในระบบเป็นแบบเทอร์โมไซฟอน ความเร็วของน้ำอยู่ในย่านลามินาร์ โดยให้ มีราคาถูก เมื่อเทียบกับ Laser Doppler Anemometer ใช้สะดวกและมีความเที่ยงตรงพอควร .

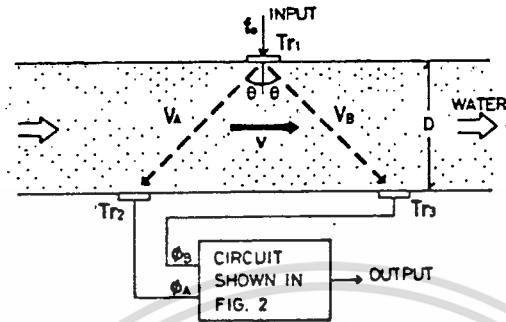


Fig. 1. A system for measuring the velocity of a flowing liquid, where  $V_A = C - V \cos \theta$  and  $V_B = C + V \cos \theta$ .

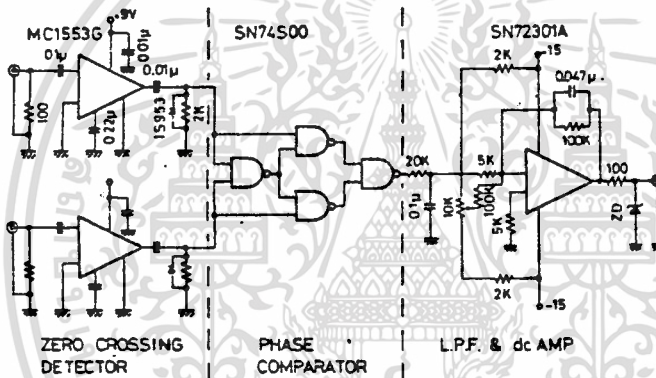


Fig. 2. Schematic diagram of the circuit in the experiment, consisting of two zero crossing detectors, a phase comparator, a low-pass filter, a dc amplifier.

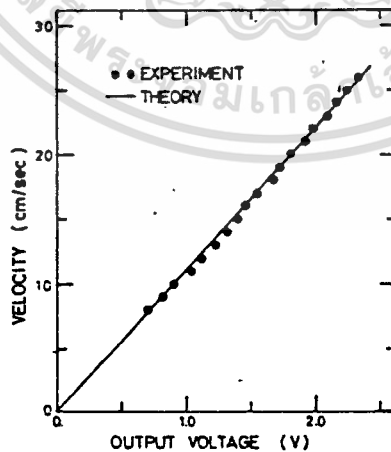


Fig. 3. Liquid velocity versus dc output voltage, where the solid straight line is for theoretical and  $\bullet$  is for experimental.



ในระบบนี้ถึงสะสมน้ำร้อนจะต้องอยู่สูงกว่าแผงรับรังสี เมื่อมีรังสีดวงอาทิตย์ ตกกระทบแผงรับรังสี ๆ จะรับพลังงานความร้อนของแสงอาทิตย์ แล้วส่งผ่านความร้อน (conduction) ให้กับน้ำในท่อของแผงรับรังสีนั้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของน้ำในแผงรับรังสีระหว่างจุด 1 และ 2 (ในรูปที่ 2-1) โดยที่จุด 2 จะมีความหนาแน่นของน้ำน้อยกว่าจุด 1 ทำให้น้ำลอยตัวเข้าสู่ถึงสะสมน้ำร้อน น้ำที่จุด 1 ก็ไหลเข้าไปแทนที่ ทำให้เกิดการไหลวนของน้ำในระบบจากจุด  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 1$  ซึ่งการไหลแบบนี้เป็นแบบการพาความร้อนตามธรรมชาติ {natural (free) convection} น้ำในระบบจะหยุดไหลวนตามทางดังกล่าว เมื่อพลังงานความร้อนที่รับได้จากดวงอาทิตย์มีค่าน้อยกว่าพลังงานความร้อนในระบบ แล้วจะเกิดการไหลย้อนกลับแบบเทอร์โมไซฟอน (reverse thermosyphon) จาก  $1 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$  น้ำในระบบจะจัดตัวเองจนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำสม่ำเสมอ จึงหยุดไหล

ในการหาคูณสมบัติต่าง ๆ ของระบบ เช่น ประสิทธิภาพและอื่น ๆ จำเป็นที่จะต้องทราบอัตราการไหลของมวลของน้ำในระบบ ซึ่งสามารถทำการวัดได้โดยตรงหลายวิธีดังได้กล่าวถึงแล้วในบทที่ 1 และสามารถคำนวณได้จาก การวัดค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

ในการคำนวณหาอัตราการไหลของมวลของน้ำในระบบแบบนี้ทางทฤษฎีสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีคือ

1. วิธีของ Close [1] ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้แผนภาพอุณหภูมิ-ความสูง
2. วิธีของ Duffie และ Beckman [27] ใช้รูปจำลอง (model)

ที่ง่ายกว่า โดยการสมมติว่าอุณหภูมิแตกต่างของน้ำที่ไหล เข้ากับออกจากแผงรับรังสีมีค่าคงที่ แต่วิธีนี้ใช้ได้เฉพาะช่วงเวลากลางวันเท่านั้นในช่วงเช้าและเย็นใช้ไม่ได้

### 2.1.1 วิธีของ Close [1]

#### 2.1.1-1 Thermosyphon Head ( $H_T$ )

รูปที่ 2-1 เป็นแผนภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ที่มีการไหลของน้ำในระบบเป็นแบบการพาตามธรรมชาติ ตามรูปแบบของ Close ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของน้ำในแผงรับรังสีจะทำให้เกิด thermosyphon head ขึ้นการที่จะพิจารณาอัตรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลแบบเทอร์โมไซฟอน จำเป็นที่จะต้องทราบการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของน้ำ ในทุก ๆ ส่วนของระบบ นอกจากนี้จำเป็นต้องทราบ profile ของการกระจายของอุณหภูมิ ตามส่วนต่าง ๆ ของระบบด้วย เพื่อที่จะใช้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของน้ำใน ระบบได้

รูปที่ 2-2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามส่วนต่าง ๆ ของระบบโดยมี ข้อสมมุติดังนี้ [ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 1]

1. การกระจายของอุณหภูมิในแนวตั้งในถังสะสมน้ำร้อน และแผงรับรังสีเป็นแบบ เชิงเส้น ดังนั้น 1-2 และ 5-6 จะเป็นเส้นตรง

2. น้ำร้อนจากแผงรับรังสีลอยตัวไปอยู่ที่ส่วนบนสุดของถังสะสมน้ำร้อน ดังนั้น จุดที่ 4 จึงอยู่บนเส้นตรง 5-6

3. ไม่มีการสูญเสียความร้อนในท่อส่งน้ำ (ทั้งท่อส่งน้ำเย็น และท่อส่งน้ำร้อน) ดังนั้นจุด 1 และ 5, 2 และ 3 มีอุณหภูมิเท่ากัน

พื้นที่ของรูป 5 เหลี่ยม 12345 (ในรูปที่ 2-2) จะเป็นค่า thermosyphon head

Close สมมุติว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะ (S) กับอุณหภูมิ (T) เป็น แบบ quadratic คือ

$$S = AT^2 + BT + C \quad (2-1)$$

ถ้า T มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ค่าของค่าคงที่ต่าง ๆ สำหรับช่วงอุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$  มีค่าดังนี้

$$A = -4.05 \times 10^{-6} \quad ^{\circ}\text{C}^{-2}$$

$$B = -3.91 \times 10^{-5} \quad ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$C = 1.00026$$

ความถ่วงจำเพาะที่ตำแหน่ง 1-5 และ 2-3 คำนวณได้โดยใช้สมการที่ (2-1) แต่ตรงกลางระหว่างตำแหน่ง 1-2 และ 5-4 จะไม่เป็นเส้นตรงเหมือนข้อสมมุติ เพราะว่า สมการที่ (2-1) มีเทอมกำลังสองของอุณหภูมิ แต่ที่พอจะอนุโลมให้เป็นเส้นตรงได้ ด้วยการ

สมมุติแบบนี้กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับความสูง จะมีรูปเหมือนกับรูปที่ 2-2

$$H_T = \frac{1}{2} (S_1 - S_2) \left[ 2(h_3 - h_1) - (h_2 - h_1) - \frac{(h_3 - h_5)^2}{(h_6 - h_5)} \right] \quad (2-2)$$

$$\text{ให้ } f(h) = 2(h_3 - h_1) - (h_2 - h_1) - \frac{(h_3 - h_5)^2}{(h_6 - h_5)} \quad (2-3)$$

$$\therefore H_T = \frac{1}{2} (S_1 - S_2) f(h) \quad (2-4)$$

แทนค่า S จากสมการที่ (2-1) ในสมการที่ (2-4)

$$H_T = \frac{1}{2} \left[ A(T_1^2 - T_2^2) + B(T_1 - T_2) \right] f(h) \quad (2-5)$$

$$\text{ให้ } T_m = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (2-5)$$

$$\therefore H_T = \frac{T_1 - T_2}{2} (2AT_m + B) f(h) \quad (2-6)$$

### 2.1.1-2 การสูญเสียเนื่องจากการเสียดทาน (Friction Losses)

ในระบบท่อน้ำร้อนแบบนี้ ความแตกต่างของความหนาแน่นของน้ำในระบบมีค่าต่ำทำให้ driving head มีค่าน้อย จึงมีการไหลของน้ำในระบบเป็นแบบลามินาร์

โดยการใช้สมการ Darcy-Weisbach คำนวณหาการสูญเสียในระบบท่อ

$$H_f = \frac{f l v^2}{2gD} + \frac{KV^2}{2g} \quad (2-7)$$

$$\text{โดยที่ } f = \frac{64}{R_n} = \frac{64\nu}{VD} \quad (2-8)$$

เทอม  $\frac{KV^2}{2g}$  แสดงถึงผลของการสูญเสียเนื่องจากข้อต่อ ข้องอ ประตูน้ำ และอื่น ๆ

ในระบบท่อ

ความหนืด kinematic ( $\nu$ ) ของน้ำ คำนวณในเทอมของอุณหภูมิจลเยสของระบบ ( $T_m$ )

สมการที่ (2-6) = สมการที่ (2-7)

$$\frac{T_1 - T_2}{2} (2AT_m + B) f(h) = \frac{f l v^2}{2gD} + \frac{Kv^2}{2g}$$

เพราะฉะนั้นความเร็วเฉลี่ยของน้ำที่ไหล จะเท่ากับ

$$v = \left[ \frac{\frac{(T_1 - T_2)}{2} (2AT_m + B) f(h)}{\frac{f l}{2gD} + \frac{K}{2g}} \right]^{1/2} \quad (2-9)$$

จากค่า  $v$  ที่ได้สามารถคำนวณหาค่าอัตราการไหลของมวลของน้ำได้ดังนี้

$$\dot{m} = \frac{\rho D^2}{4} \times v \quad (2-10)$$

### 2.1.1-3 ข้อสมมุติในการวิเคราะห์ของ Close [ได้กล่าวถึงแล้วในบทที่ 1]

1. ท่อฟ้าแจ่มใส ไม่มีเมฆ หมอก ตลอดวัน
2. ไม่มีการถ่ายน้ำออกจากระบบระหว่างการทดลอง
3. รังสีดวงอาทิตย์เป็น sine function ซึ่งมีค่าสูงสุดที่เวลา 12.00 น.
4. อุณหภูมิแวดล้อมเป็น sine function เช่นกัน
5. การไหลของน้ำในท่อเป็นแบบ fully developed laminar
6. ความหนาแน่นของน้ำในท่อของแผงรับรังสี ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำที่พื้นที่หน้าตัดนั้น โดยไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามแนวขวางของท่อ
7. การกระจายของอุณหภูมิของน้ำในถังสะสมน้ำร้อน และท่อ riser ของแผงรับรังสีเป็นแบบเชิงเส้น
8. การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของน้ำในถังสะสมน้ำร้อนและท่อ riser ของแผงรับรังสี เป็นแบบเชิงเส้น เช่นเดียวกัน
9. ไม่มีการสูญเสียความร้อนจากท่อส่งน้ำ ออกไปยังภายนอก
10. น้ำร้อนที่มาจากแผงรับรังสี จะลอยตัวขึ้นสู่ส่วนบนสุดของถังสะสมน้ำร้อน
11. ความหนืดของน้ำทั้งระบบ คัดจากอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบ



เท่ากับ bulk mean temperature แต่จะไม่เป็นจริงสำหรับท่อ riser ของแผงรับรังสีซึ่งน้ำได้รับความร้อน จากผิวท่อ ดังนั้นจะมีการลดของอุณหภูมิจากผิวท่อไปสู่ใจกลางท่อ จากผลของ profile ของอุณหภูมิในท่อ riser นี้จะทำให้ bulk mean temperature แตกต่างจาก spatial mean temperature ตลอดพื้นที่หน้าตัดของท่อ

bulk mean temperature ขึ้นอยู่กับการกระจายของความเร็วและอุณหภูมิ ตลอดพื้นที่หน้าตัดของท่อ ส่วนน้ำหนักของน้ำขึ้นอยู่กับ การกระจายของ spatial mean temperature ไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วของน้ำในท่อ

### 2.1.1-5 การแก้ไขรูปจำลองทางคณิตศาสตร์ใหม่โดย Ranatunga [9]

Ranatunga ได้แก้ไขข้อบกพร่องของรูปจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์แบบนี้ใหม่ โดยยึดถือแนวทางของ Close และได้แก้ไขสิ่งต่อไปนี้คือ

#### (1) การเสียดทาน (Friction)

เนื่องจากความยาวในการเกิดการไหลแบบ fully developed laminar ซึ่งเรียกว่า transition length มีค่ามาก เพราะฉะนั้นในการวิเคราะห์การเสียดทานของการไหลของน้ำในท่อจะคิดถึงผลของการไหลในช่วง developing laminar

$$\text{transition length, } L' = 0.058 R_n D \quad (2-11)$$

ถ้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ,  $D = 2.25 \text{ cm}$  จะหาค่า  $L'$  ที่  $R_n$  ต่าง ๆ ได้

ดังตารางที่ 1

$R_n$	$L'$ (cm)
100	13.05
500	65.25
1,000	130.5
2,000	261

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าค่า  $R_n$  สูง (ในช่วงการไหลแบบลามินาร์) ค่า transition length มีค่ามากกว่าความยาวของท่อ riser โดยทั่ว ๆ ไป ดังนั้นจึงเกิดการเสียดทานมากขึ้นกว่าในช่วงที่มีการไหลแบบ fully developed laminar การเสียดทานในช่วง developing laminar จะมีผลอย่างมากต่อการไหลแบบเทอร์โมไฮฟอนในระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์

(2) การแก้ไขสำหรับกรณีที่มีการไหลอยู่ในช่วง developing laminar

Langhaar [29] ได้วิเคราะห์การไหลในช่วงนี้ในท่อตรง และผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 2 โดยที่

$$M = \frac{\text{pressure drop ในช่วง developing laminar}}{\text{pressure drop ในช่วง fully developed laminar (ที่ความยาวท่อและ } R_n \text{ เดียวกัน)}} \quad (2-12)$$

ตารางที่ 2

$\frac{l}{D R_n}$	M
0.0137	3.24
0.0179	2.78
0.0237	2.39
0.0341	2.01
0.0449	1.78
0.062	1.57
0.076	1.47
0.1	1.36
0.3	1.12
0.5	1.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลในตารางที่ 2 สามารถเขียนเป็นสมการของ M ได้ดังนี้

$$M = 1.0 + \frac{0.038}{\left[ \frac{l}{D R_n} \right]^{0.96}} \quad (2-13)$$

ตัวอย่างของท่อ riser ที่ใช้กันจะมีความยาวประมาณ 1.5 m และเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ = 0.01 m

ที่  $R_n = 1000$ ,  $M = 1.23$  แสดงว่าคำนวณได้ค่าการเสียดทานต่ำกว่าที่เป็นจริง 19%

ที่  $R_n = 2000$ ,  $M = 1.46$  แสดงว่าคำนวณได้ค่าการเสียดทานต่ำกว่าที่เป็นจริง 32%

ดังนั้น correction factor สำหรับการไหลแบบ developing laminar จะต้องเพิ่มเข้าไปในสมการที่ (2-7) ด้วย

### (3) Minor Losses

งานวิจัยที่ผ่านมาคิด minor losses จากการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ แต่ในการไหลแบบลามินาร์จะมี kinetic energy correction factor 100 % นั่นคือค่า head loss coefficient มีค่าเป็น 2 เท่าของค่าที่ได้จากการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\int \frac{v^2}{2g} dQ = \int_0^R \frac{v^3}{g} 2\pi r dr = 2 \left[ \frac{v^2}{2g} Q \right] \quad (2-14)$$

สำหรับการสูญเสียเนื่องจากการเปลี่ยนขนาดท่อจาก Header ไปสู่ riser จะมีค่า head loss coefficient สำหรับการไหลแบบ fully developed laminar ดังนี้

$$K_L = \left[ \frac{2}{3} \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 - \frac{8}{3} \left( \frac{A_1}{A_2} \right) + 2 \right] \quad (2-15)$$

ตัวอย่างเมื่อ  $A_1 : A_2 = 4 : 1$  จะได้ค่า  $K_L = 1.38$  แต่ head loss coefficient ในการไหลแบบเทอร์บูเลนต์,  $K_T = 0.56$

หลังจากใช้ correction factor แล้วความผิดพลาด (error) ในการคำนวณอัตราการไหลของมวลของน้ำที่ค่า  $R_n$  สูง (สูงกว่า 400 ขึ้นไปจนถึง 2000) จะลดลงมากแต่ความผิดพลาดที่ค่า  $R_n$  ต่ำยังแก้ไขไม่ได้

#### (4) Thermosyphon Head

ตามปกติการคำนวณ thermosyphon head จะสัมพันธ์กับความหนาแน่นของน้ำที่จุดต่าง ๆ ในวงจรรการไหล และสัมพันธ์กับ bulk mean temperature ณ จุดนั้น ๆ และใช้สมการกำลังสอง

$$\rho = AT^2 + BT + C \quad (2-16)$$

การคำนวณความหนาแน่นของน้ำจาก bulk mean temperature ในท่อส่งน้ำจะให้ค่าถูกต้อง แต่ในท่อ riser จะต้องคิดถึงการกระจายของอุณหภูมิที่ขวางการไหลด้วย นั่นคือ thermosyphon head จะขึ้นอยู่กับ spatial average temperature ไม่ขึ้นอยู่กับ bulk mean temperature

ตัวอย่าง ค่าความแตกต่างของความหนาแน่นของน้ำที่คำนวณจาก bulk mean temperature และ spatial average temperature ในท่อ riser กรณีการไหลแบบ fully developed laminar จะแสดงให้เห็นดังต่อไปนี้

profile ของอุณหภูมิเมื่อมี heat flux คงที่

$$T = T_m - \frac{2V}{\alpha} \frac{dT_m}{dl} \left( \frac{3}{16} R^2 + \frac{r^4}{16R^2} - \frac{r^2}{4} \right) \quad (2-17)$$

ความหนาแน่นเฉลี่ยตลอดพื้นที่หน้าตัดจะมีสมการดังนี้

$$\bar{\rho}_1 = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi r \rho(r) dr \quad (2-18)$$

$\rho(r)$  คำนวณจากสมการที่ (2-16) และ (2-17)

ผลของการอินทิเกรตสมการที่ (2-18) จะเป็นดังนี้

$$\bar{\rho}_1 = A \left[ T_m^2 + \frac{6}{11} G_1 T_m + \frac{36.2}{121} G_1^2 \right] + B \left[ T_m + \frac{3}{11} G_1 \right] + C \quad (2-19)$$

$$\text{โดยที่} \quad G_1 = \frac{22VR^2}{96d} \frac{dT_m}{dx} \quad (2-20)$$

ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของน้ำเมื่อคิดจาก bulk mean temperature จะมีสมการดังนี้

$$\bar{\rho}_2 = A T_m^2 + B T_m + C \quad (2-21)$$

สมการที่ (2-21) ใช้ได้กับตรงบริเวณทางเข้าของท่อ riser ซึ่งการกระจายของอุณหภูมิสม่ำเสมอ ตลอดพื้นที่หน้าตัดของท่อ แต่ตรงทางออกของท่อ riser จะใช้สมการที่ (2-19) เมื่อคิดว่าการไหลเป็นแบบ fully developed laminar

ถ้าอุณหภูมิตรงบริเวณทางเข้าของท่อ riser มีค่าคงที่ ก็สามารถคำนวณค่า riser thermosyphon head ได้จากสมการที่ (2-19) และ (2-21) ดังนี้

(ก) thermosyphon head คำนวณจากสมการที่ (2-21) จะเป็นดังนี้

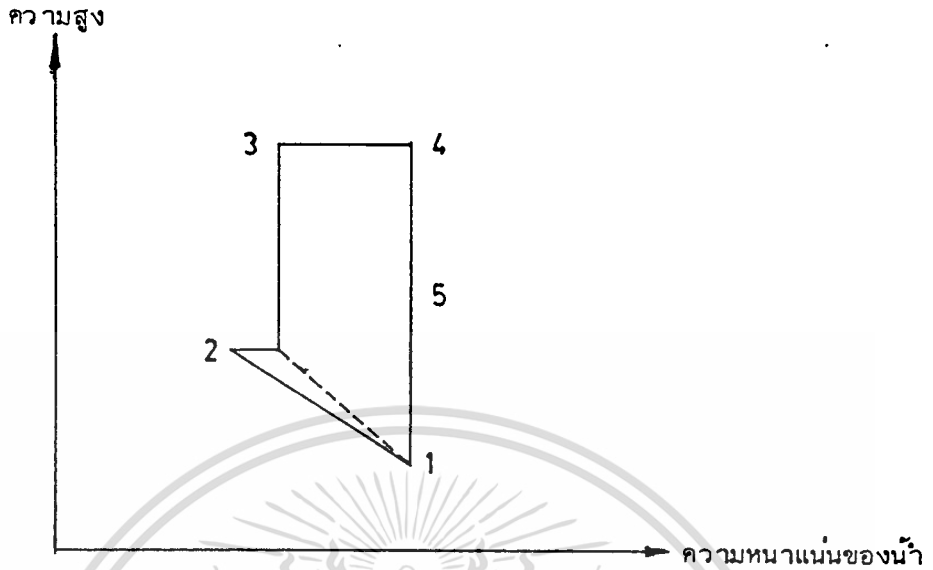
$$\begin{aligned} H_{TA} &= 0.5 gH (\rho_{2 \text{ in}} - \rho_{2 \text{ out}}) / \bar{\rho} \\ &= 0.5 gH \left[ A(T_{m_i}^2 - T_{m_o}^2) + B(T_{m_i} - T_{m_o}) \right] / \bar{\rho} \end{aligned} \quad (2-22)$$

(ข) thermosyphon head คำนวณจากสมการที่ (2-19) โดยคิดค่าความหนาแน่นของน้ำตลอดความยาวของท่อ riser เป็นแบบเชิงเส้น ตรงทางเข้าท่อ riser อุณหภูมิจะกระจายอย่างสม่ำเสมอ แต่ตรงทางออกจะมี profile ของอุณหภูมิแบบพาราโบลา {สมการที่ (2-19)}

$$\begin{aligned} H_{TB} &= 0.5 gH (\rho_{2 \text{ in}} - \rho_{1 \text{ out}}) / \bar{\rho} \\ &= 0.5 gH \left[ A(T_{m_i}^2 - T_{m_o}^2) + B(T_{m_i} - T_{m_o}) - \right. \\ &\quad \left. A\left(\frac{6}{11} G_1 T_{m_o} + \frac{36.2}{121} G_1^2\right) - \frac{3}{11} B G_1 \right] / \bar{\rho} \end{aligned} \quad (2-23)$$

การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของน้ำในวงจรรไหล จากการวิเคราะห์

ข้างต้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3

รูปที่ 2-3 แสดงให้เห็นว่า น้ำได้ผสมกันใน Header บน ความหนาแน่นเฉลี่ยของน้ำจะเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่า bulk mean temperature จะไม่เปลี่ยนแปลง spatial mean temperature เมื่อน้ำผสมกันใน header บนเกิดขึ้นโดยการส่งผ่านพลังงานความร้อนข้ามการไหลของน้ำ ซึ่งเป็นผลของการเปลี่ยน profile ของความเร็วจากแบบไม่สม่ำเสมอ เมื่อออกจากท่อ riser มาเป็นแบบสม่ำเสมอใน header บนหลังจากผสมกันแล้ว

การใช้สมการที่ (2-22) คำนวณ อาจจะทำให้ค่าที่ได้น้อยกว่าค่าที่เป็นจริงถึง 40% ซึ่งแล้วแต่ค่า  $R_n$  ที่ค่า  $R_n$  ต่ำ ความแตกต่างจะน้อย แต่ที่ค่า  $R_n$  สูง ความแตกต่างจะมีค่ามาก ดังนั้นการคำนวณค่า thermosyphon head ที่ค่า  $R_n$  สูง จะสมมุติว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของน้ำ ตามความยาวของท่อ riser จะเหมือนกับส่วนแรก ของท่อ riser ที่ยาวมาก ซึ่งมีค่า bulk mean temperature gradient ค่าเดียวกัน ดังนั้นความหนาแน่นที่จุดใด ๆ สามารถคำนวณได้โดยคิดว่ามี linear density gradient ระหว่างทางเข้าและความหนาแน่นซึ่งได้จากการอินทิเกรต fully developed temperature profile {สมการที่ (2-19)} โดยคิดความยาว  $L$  ตามท่อ riser

$L = \text{thermal development length}$   
 $= 0.05 R P_n P_r D$  (2-24)

จากข้อสมมุติดังกล่าว จะเขียนสมการของ net thermosyphon head

ในท่อ riser ได้ดังนี้

$$H_{TC} = (0.5 gH/\bar{\rho}) \frac{H}{L} \left[ A(T_{m_i}^2 - T_{m_L}^2) + B(T_{m_i} - T_{m_L}) - A\left(\frac{6G}{111} T_{m_L} + \frac{36.2}{121} G_1^2\right) - B \frac{3}{11} G_1 \right] / \bar{\rho}$$
 (2-25)

$T_{m_L}$  หาได้จากการ extrapolate ค่า bulk mean temperature gradient ในท่อ riser ไปยังค่า  $L$

2.1.2 วิธีของ Duffie และ Beckman [27]

จากสมการของพลังงานความร้อนที่แผงรับรังสีรับได้

$$Q_u = F_R A_C [S - U_L (T_{f,i} - T_a)]$$
 (2-26)

กับ  $Q_u = \dot{m} C_p (T_{f,o} - T_{f,i}) = \dot{m} C_p \Delta T_f$  (2-27)

โดยที่  $F_R = \frac{\text{พลังงานความร้อนที่แผงรับรังสีรับได้}}{\left[ \text{พลังงานความร้อนที่แผงรับรังสีรับได้ ถ้าแผงรับรังสีมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิน้ำเข้าแผงรับรังสีนั้น} \right]}$

$$= \frac{G C_p}{U_L} \left[ 1 - \exp(-U_L F' / G C_p) \right]$$
 (2-28)

$F' = \frac{\text{พลังงานความร้อนที่แผงรับรังสีรับได้}}{\left[ \text{พลังงานความร้อนที่แผงรับรังสีรับได้ ถ้าแผงรับรังสีมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในแผงรับรังสีนั้น} \right]}$

$$= \frac{1/U_L}{W \left[ \frac{1}{U_L \{(W-D) F + D\}} + \frac{1}{h_{f,i} D_i} + \frac{1}{C_b} \right]}$$
 (2-29)

$$F = \frac{\tanh M'(W-D)/2}{M'(W-D)/2} \quad (2-30)$$

$$M' = \left[ \frac{U_L}{k\delta} \right]^{1/2} \quad (2-31)$$

$$C_b = \frac{k_b b}{\gamma} \quad (2-32)$$

$$U_L = U_t + U_b \quad (\text{ไม่คิด edge loss เพราะมีค่าน้อยมาก}) \quad (2-33)$$

$$U_b = \frac{1}{\frac{L}{k_i} + \frac{1}{h_w + \frac{\sigma \epsilon (T_i^4 - T_{sky}^4)}{(T_i - T_a)}}} \quad (2-34)$$

$$T_{sky} = 0.0552 T_a^{1.5} \text{ } ^\circ K \quad (2-35)$$

โดยทั่วไปจะสมมติให้  $T_{sky} = T_a$

$$U_t = \frac{1}{\frac{1}{\frac{k_{air}}{x_{p-c}} + h_{p-c}} + h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_w + h_{r,c-sky}}} \quad (2-36)$$

สมการที่ (2-36) ใช้สำหรับแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ที่มีแผ่นครอบใสชั้นเดียว

$$h_{p-c} = \frac{N_u k_{air}}{l} ; l = \text{ระยะห่างระหว่างแผ่นดูดแสงกับแผ่นครอบใส} \quad (2-37)$$

$$N_u = \left[ 0.06 - 0.017 \left( \frac{s}{90} \right) \right] G_r^{1/3} \quad (2-38)$$

$$G_r = \frac{g\beta\Delta T l^3}{\nu^2} \quad (2-39)$$

$$\beta = \frac{1}{T} \quad \text{สำหรับอากาศ} \quad (2-40)$$

$$h_w = 5.7 + 3.8 v, \quad 0 < v < 5 \text{ m/s, McAdams [30]} \quad (2-41)$$

$$= 2.8 + 3.0 v, \quad 0 < v < 7 \text{ m/s, Watmuff et.al. [31]} \quad (2-42)$$

ซึ่งควรจะใช้สมการที่ (2-42) มากกว่าสมการที่ (2-41) เพราะว่าสมการที่ (2-41) คัดผลของการแผ่รังสีรวมกับการพาความร้อน แต่สมการที่ (2-42) คัดแต่ผลของการพาความร้อนอย่างเดียว [32]

$$h_{r,p-c} = \frac{\sigma(T_p^2 + T_c^2)(T_p + T_c)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} \tag{2-43}$$

$$h_{r,c-sky} = \sigma\epsilon_c(T_c^2 + T_a^2)(T_c + T_a) \tag{2-44}$$

$$S = H_t R(T_a) e \tag{2-45}$$

$$(T_a) e = (T_a) + \frac{U_L}{U_2} (1 - T_a) \tag{2-46}$$

$$(T_a) = \frac{T_a}{1 - (1 - \alpha) \rho_d} \tag{2-47}$$

$$\rho_d = (1 - T_{r,n}) \tag{2-48}$$

$$T_{r,n} = \frac{(1 - \rho)}{(1 + \rho)} \tag{2-49}$$

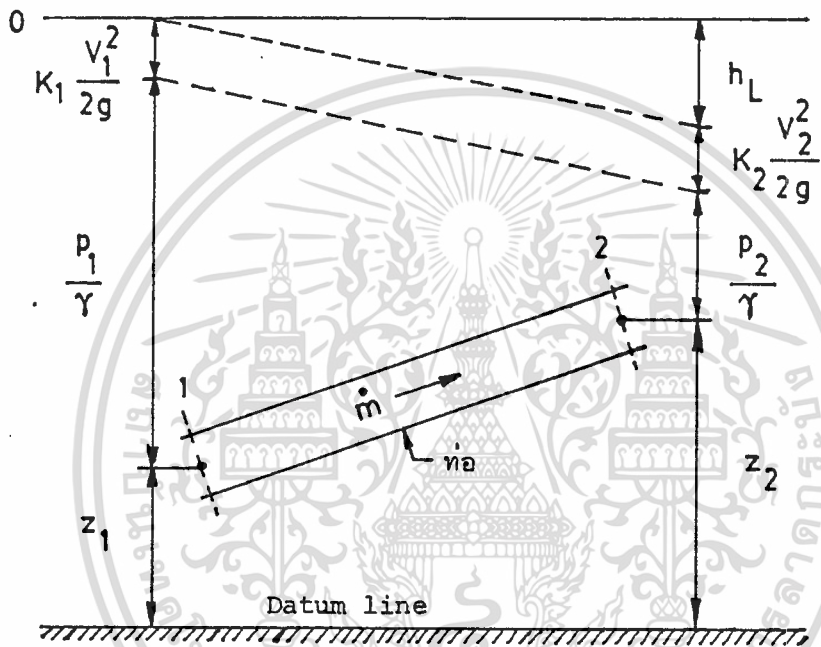
เนื่องจากสมการที่ (2-26) = สมการที่ (2-27)  
จะได้สมการของอัตราการไหลของมวลของน้ำดังนี้

$$\dot{m} = \frac{-U_L F' A_C}{c_p \ln \left[ 1 - (U_L \Delta T_F) / \{S - U_L (T_{f,i} - T_a)\} \right]} \tag{2-50}$$

โดยคิดว่า  $F'$  เป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอัตราการไหลของมวลของน้ำ

## 2.2 การไหลของน้ำในท่อกลม [33-38]

### 2.2.1 สมการเบื้องต้นสำหรับการไหลของน้ำ (ซึ่งเป็นแบบ incompressible flow) ในท่อ



รูปที่ 2-4

จากรูปที่ 2-4 เขียนสมการ Bernoulli สำหรับการไหลของน้ำในท่อได้ดังนี้

$$\frac{p_1}{\gamma} + K_1 \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + K_2 \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_L \quad (2-51)$$

ในปัญหาของการไหลของน้ำในท่อส่วนใหญ่จะสามารถตัดเทอมที่มี  $K$  ทิ้งได้ หรือไม่ก็จะตัดกันไปเอง ส่วนค่า  $z_1, z_2$  จะหักล้างกันหมดไปถ้าท่อวางอยู่ในแนวราบ  
จากสมการที่ (2-51)

$$h_L = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \frac{\Delta p}{\gamma} \quad (2-52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Darcy-Weisbach ให้สมการสำหรับคำนวณหาค่า  $h_L$  ดังนี้

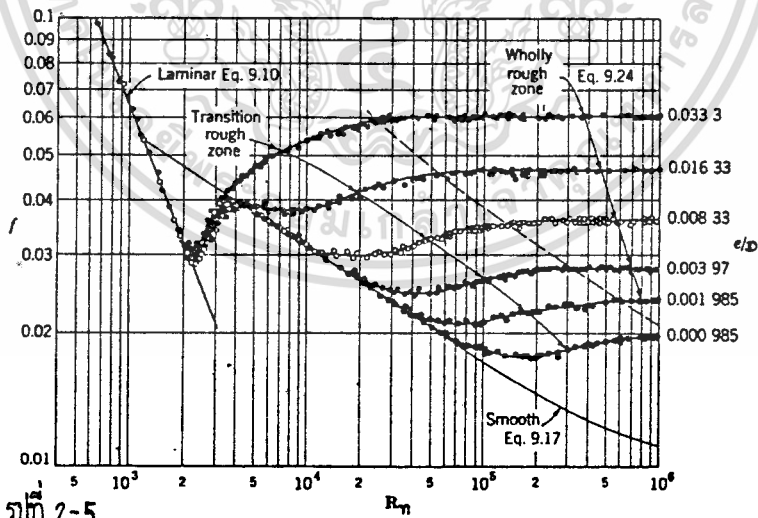
$$h_L = f \frac{l}{D} \frac{v^2}{2g} \quad ; \quad f = \text{friction factor} \quad (2-53)$$

$$\text{frictional stress, } \tau_o = \frac{f \rho v^2}{8} \quad (2-54)$$

$$\text{frictional velocity, } v^* = v \sqrt{\frac{f}{8}} \quad (2-55)$$

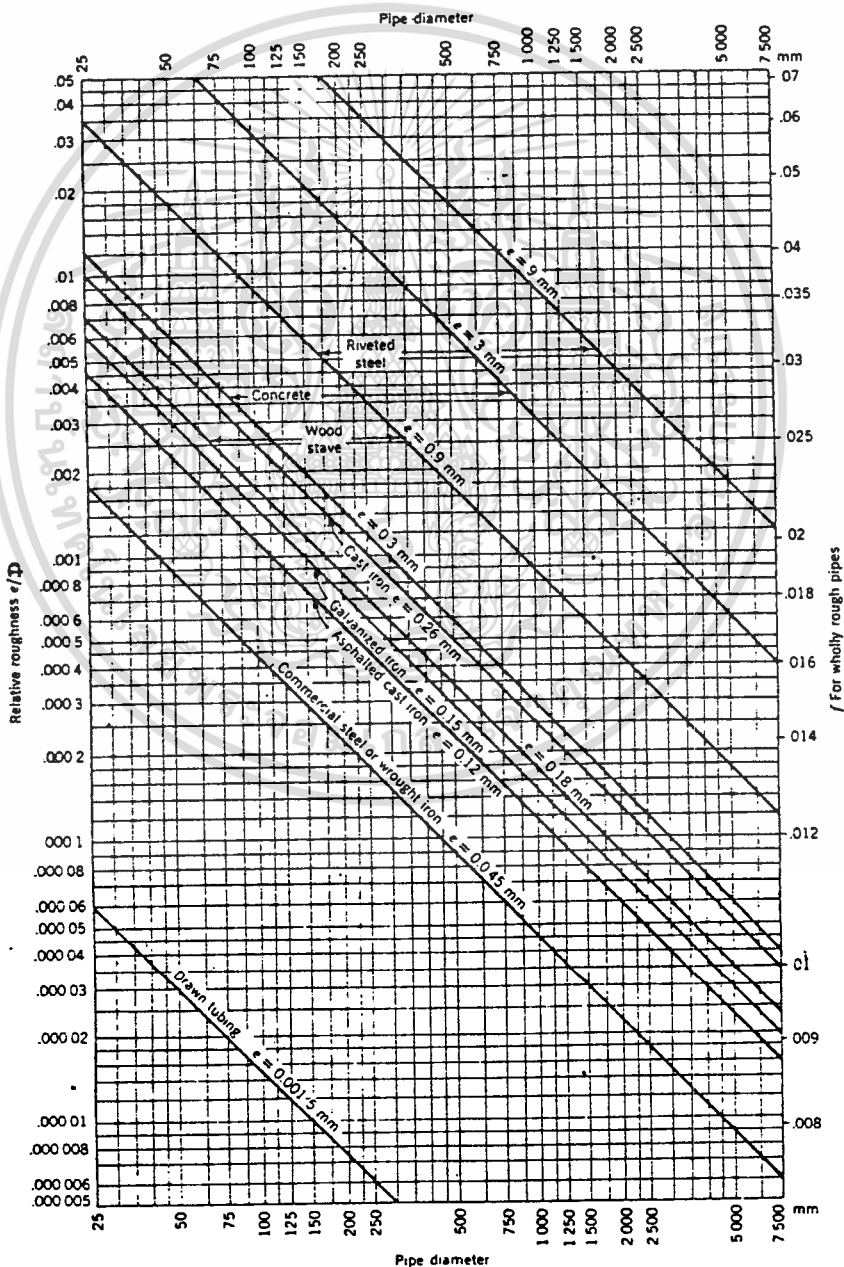
friction factor,  $f$  ขึ้นอยู่กับค่า Reynolds number,  $R_n$  และค่า relative roughness,  $(e/D)$  ของท่อ

กราฟที่ใช้ในการหาค่า friction factor ซึ่งได้จากการทดลองที่ค่า Reynolds number ต่าง ๆ โดยมี relative roughness เป็นตัว parameter เรียกกราฟนี้ว่า Stanton diagram ดังรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 Stanton diagram. [ 33 ]

จากผลการทดลองของ Nikuradse [39] แสดงให้เห็นว่าในกรณีการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ในท่อเรียบและท่อขรุขระให้ผลตรงกับ Stanton diagram แต่การทดลองด้วยวิธีของ Nikuradse ใช้กับ commercial pipe ได้ผลไม่ดี เนื่องจากความขรุขระของท่อแต่อย่างไรก็ดี Colebrook [40] ได้ปรับปรุงสูตรการหาค่า  $f$  ใหม่ โดยยึดถือวิธีของ Nikuradse จากนั้น Moody [41] จึงได้นำมาพล็อตกราฟเพื่อให้ใช้ได้สะดวกในทางวิศวกรรม เรียกกราฟนี้ว่า Moody diagram ดังรูปที่ 2-6 และ 2-7



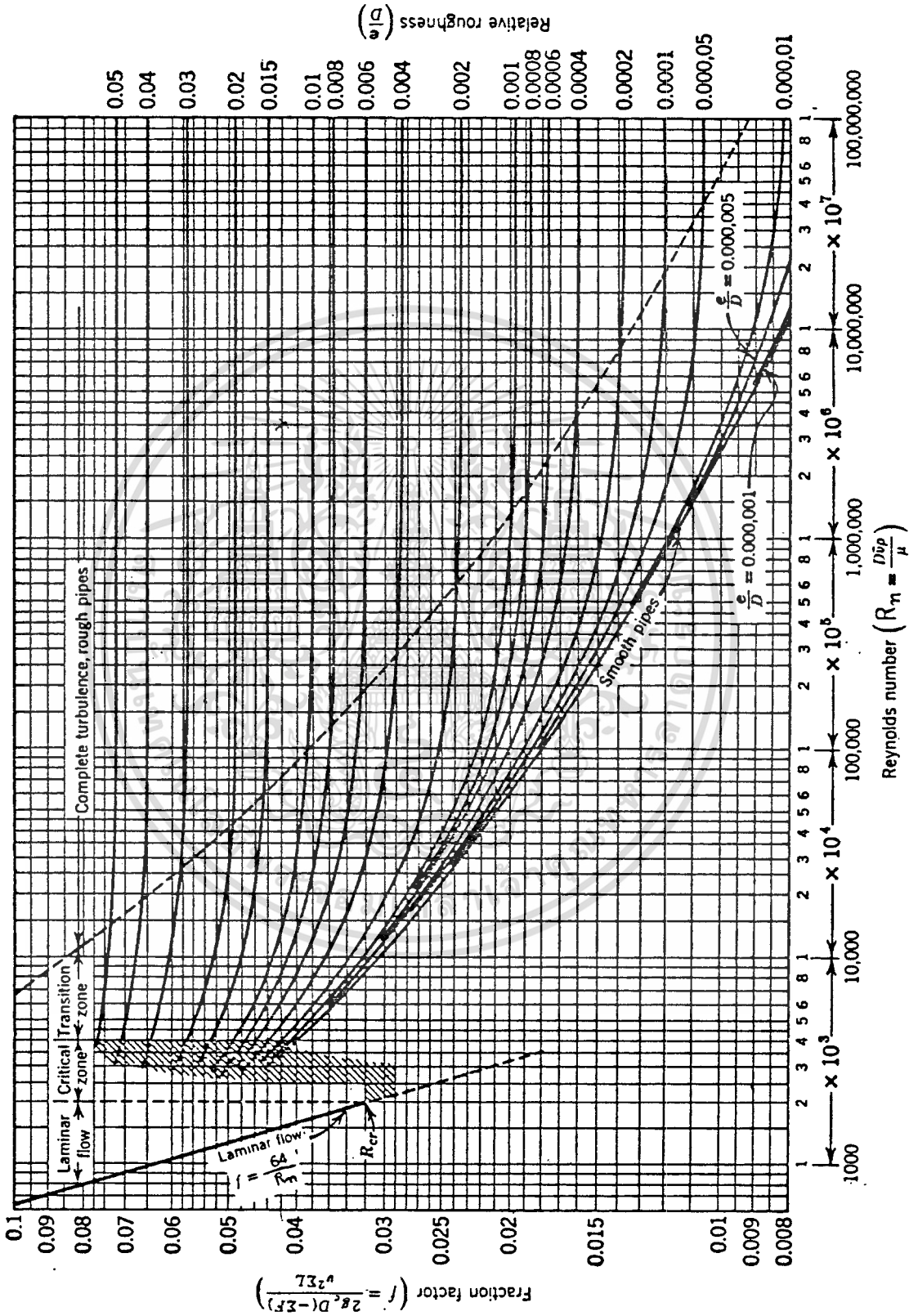
รูปที่ 2-6

Relative roughness chart [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า 2-7  
[ 67 ]

FRICITION FACTOR AS A FUNCTION OF REYNOLDS NUMBER WITH RELATIVE ROUGHNESS AS A PARAMETER.  
[Moody, L. F., *Trans. ASME*, 66, 671-84 (1944).]



ค่า Reynolds number,  $R_n$  หาได้จาก

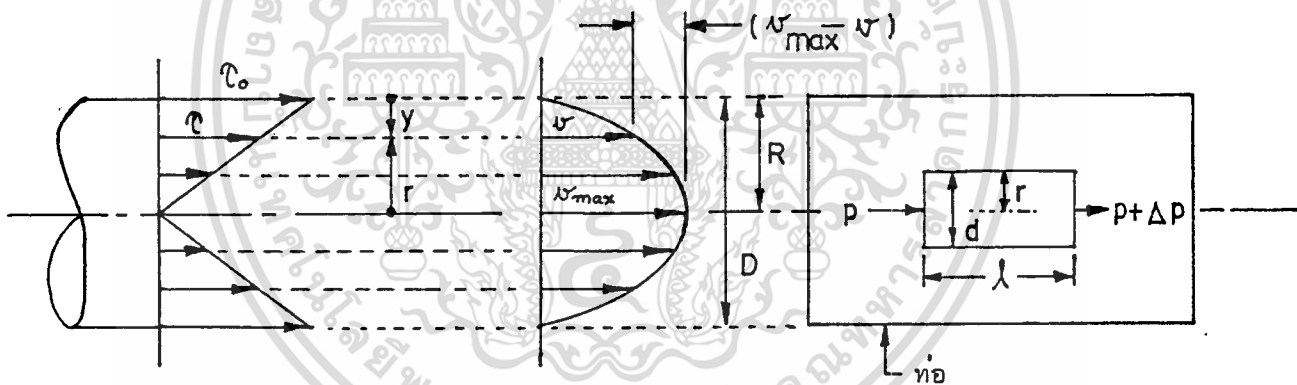
$$R_n = \frac{VD\rho}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \quad (2-56)$$

ดังนั้นถ้าทราบค่า  $R_n$  ก็สามารถหาค่า  $f$  ได้จาก Moody diagram ที่ค่า  $e/D$  ต่าง ๆ

ถ้าทราบค่าความเร็วเฉลี่ยของน้ำในท่อ, ความยาวของท่อ, ความกว้างของท่อ และ friction factor ก็สามารถคำนวณหาค่า head loss ( $h_L$ ) ได้จากสมการ Darcy-Weisbach { สมการที่ (2-53) }

### 2.2.2 การไหลแบบ fully developed laminar ในท่อกลม

การไหลแบบ fully developed laminar จะมีค่า Reynolds number อยู่ระหว่าง 0-2100



รูปที่ 2-8

ในการวิเคราะห์การไหลแบบ fully developed laminar ในท่อกลมจะมีการสมมุติดังนี้

1. profile ของ shear stress และความเร็วของน้ำในท่อจะ symmetry รอบเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ
2. profile ของ ความเร็วของน้ำในท่อเป็นแบบพาราโบลา
3. ความเร็วตรงจุดกึ่งกลางท่อจะมีค่ามากที่สุด และที่ผิวท่อมีค่าเท่ากับศูนย์
4. profile ของ shear stress แบบเชิงเส้นของน้ำในท่อคำนวณด้วยสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\tau = \frac{\gamma h_L r}{2\ell} = \frac{\Delta p r}{2\ell} \quad (2-57)$$

$$\text{และ } \tau = \mu \frac{dv}{dy} = -\mu \frac{dv}{dr} \quad (2-58)$$

สมการที่ (2-57) = สมการที่ (2-58)

$$\text{จะได้ } v = v_{\max} - K r^2, \quad K = \frac{\gamma h_L}{4\mu\ell} \quad (2-59)$$

ที่  $r = R, \quad v = 0$

$$\text{ดังนั้น } K = \frac{v_{\max}}{R^2} \quad (2-60)$$

แทนค่า  $K$  ในสมการที่ (2-59)

$$v = v_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (2-61)$$

จากสมการที่ (2-59) และ (2-60) จะได้สมการของ  $v_{\max}$  ดังนี้

$$v_{\max} = \frac{\gamma h_L R^2}{4\mu\ell} \quad (2-62)$$

อัตราการไหลแบบปริมาตรของน้ำหาได้จาก

$$Q = \int_A v \, dA = \int_0^R v \, 2\pi r \, dr \quad (2-63)$$

แทนค่า  $v$  จากสมการที่ (2-61) และ  $v_{\max}$  จากสมการที่ (2-62) ในสมการที่ (2-63) แล้วอินทิเกรตจะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$Q = \frac{\gamma h_L \pi D^4}{128 \mu \ell} = \frac{\Delta p \cdot \pi D^4}{128 \mu \ell} \quad (2-64)$$

เรียกสมการที่ (2-64) ว่า "สมการ Hagen-Poiseuille"

ความเร็วเฉลี่ย,  $V$  ของน้ำหาได้จาก

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{\gamma h_L R^2}{8\mu\ell} = \frac{v_{\max}}{2} \quad (2-65)$$

$$\therefore h_L = \frac{32 \mu \ell V}{\gamma D^2} \quad (2-66)$$

สมการที่ (2-53) = สมการที่ (2-66)

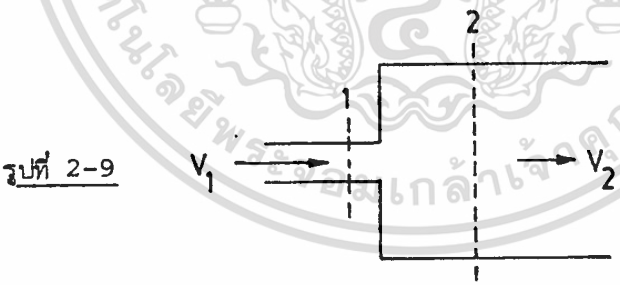
จะได้  $f = \frac{64}{R_n}$  (2-67)

2.2.3 Minor Losses ในระบบท่อ

minor losses เกิดขึ้นจากสาเหตุต่าง ๆ ดังนี้

1. การเปลี่ยนขนาดท่อให้ใหญ่ขึ้น
2. การเปลี่ยนขนาดท่อให้เล็กลง
3. ส่วนโค้งของท่อ
4. ประตุน้ำ
5. ข้อต่อแบบต่าง ๆ
6. อื่น ๆ

2.2.3-1 การขยายขนาดท่ออย่างทันทีทันใด

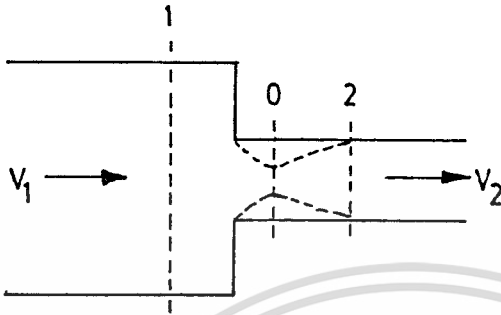


รูปที่ 2-9

$$\begin{aligned}
 h_e &= \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \times \frac{V_1^2}{2g} = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2\right]^2 \times \frac{V_1^2}{2g} \\
 &= K \frac{V_1^2}{2g} ; K = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2\right]^2 \quad (2-68)
 \end{aligned}$$

K = expansion coefficient หาได้จากการวัดและคำนวณ

### 2.2.3-2 การลดขนาดท่ออย่างทันทีทันใด



รูปที่ 2-10

$$h_c = \left( \frac{1}{C_c} - 1 \right)^2 \frac{V_2^2}{2g} \quad (2-69)$$

$$C_c = \frac{V_2}{V_0} \times \frac{A_2}{A_1} \quad (2-70)$$

$A_2/A_1$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$C_c$	0.624	0.632	0.643	0.659	0.681	0.712	0.755	0.813	0.892	1.00

ตารางที่ 3 [42]

### 2.2.3-3 การสูญเสียเนื่องจากส่วนโค้งของท่อ ประตุน้ำ และข้อต่อต่าง ๆ

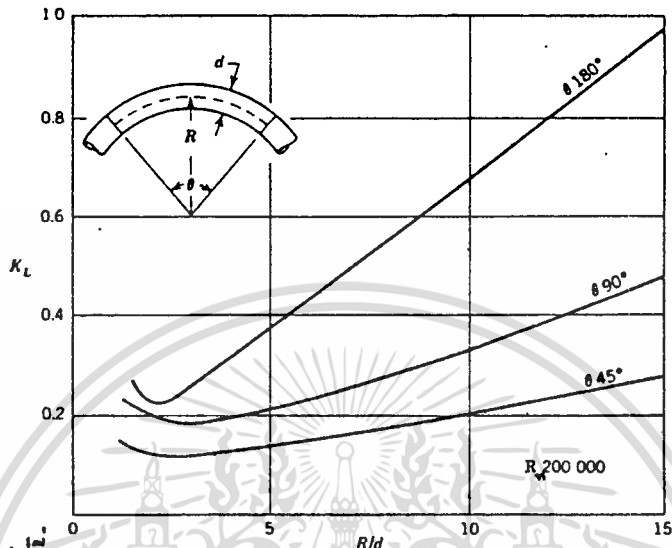
$$h_L = K_L \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} \quad (2-71)$$

$K_L$  = loss coefficient ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะต่าง ๆ ของท่อและอื่น ๆ

ตารางที่ 4 [43]

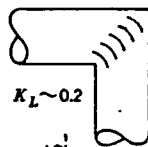
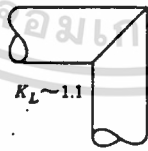
Approximate loss Coefficient,  $K_L$  for Commercial Pipe Fittings

Valves, wide open	Screwed	Flanged
Globe	10	5
Gate	0.2	0.1
Swing-check		2
Angle		2
Foot		0.8
Return bend	1.5	0.2
Elbows		
90° - regular	1.5	0.3
- long radius	0.7	0.2
45° - regular	0.4	-
- long radius	-	0.2
Tees		
Line flow	0.9	0.2
Branch flow	2	1



รูปที่ 2-11

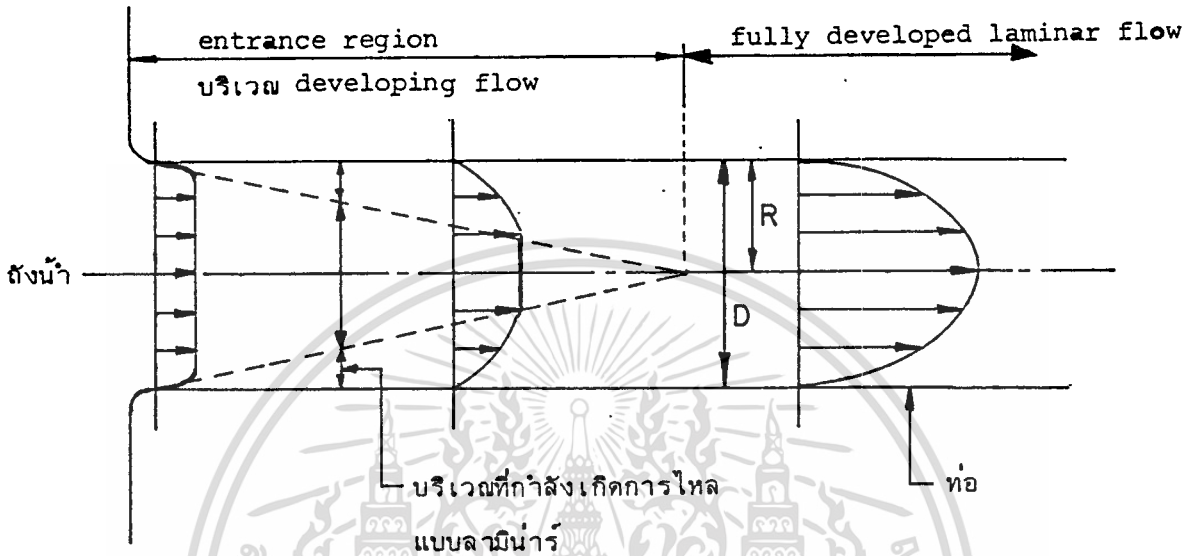
Itô's loss coefficients for smooth bends ( $R_n = 200\,000$ ). [33]



รูปที่ 2-12

Miter bends. [33]

### 2.2.4 profile ของความเร็วของน้ำที่ไหลจากถังเข้าสู่ท่อกรณีที่มีการไหลแบบลามินาร์



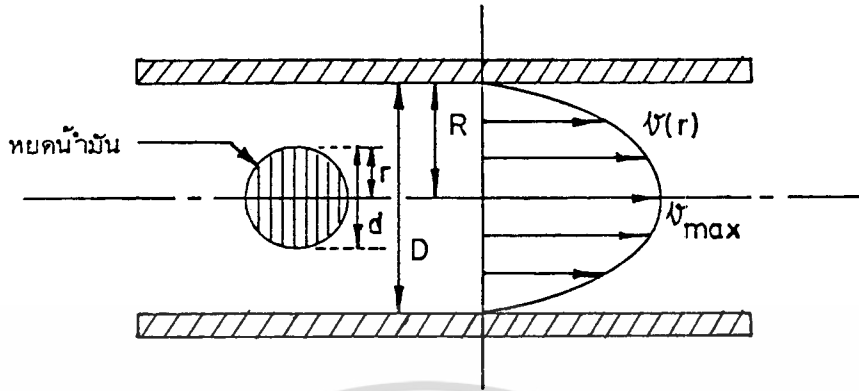
รูปที่ 2-13

ในช่วง developing flow, profile ของความเร็วของน้ำจะยังไม่ เป็นรูปพาราโบลา แต่จะค่อย ๆ เปลี่ยนจาก profile ที่สม่ำเสมอจนเป็นรูปพาราโบลาใน- ที่สุดที่ระยะทางหนึ่งแล้วก็เป็นเช่นนี้ตลอดไป ในช่วงนี้เรียกว่า fully developed flow ระยะทางของ developing flow เรียกว่า transition length,  $L'$  ซึ่ง Langhaar ได้ให้สมการไว้คำนวณดังนี้

$$L' = 0.058 R_n D \quad (2-72)$$

## 2.3 การวิเคราะห์ความเร็วเฉลี่ยของหยดน้ำมันที่มีขนาดต่าง ๆ ซึ่งไหลไปใน

ท่อที่มีน้ำไหลแบบ fully developed laminar



รูปที่ 2-14

ข้อสมมุติ :-

1. หยดน้ำมันมีลักษณะเป็นลูกกลม ๆ
2. หยดน้ำมันมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมาก เว้นแต่ที่บแสง
3. หยดน้ำมันไหลไปตรงกลางท่อเท่านั้น
4. หยดน้ำมันไม่ทำให้ profile ของการไหลของน้ำในท่อเปลี่ยน

$$v(r) = v_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (2-73)$$

$$v_w = v_{\max} / 2 \quad (2-74)$$

$$v_b = \frac{\int_0^R v(r) 2\pi r dr}{\pi R^2} \quad (2-75)$$

แทนค่าสมการที่ (2-73) และ (2-74) ในสมการที่ (2-75) แล้วอินทิเกรตจะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\frac{v_b}{v_w} = 2 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \quad (2-76)$$

จากสมการที่ (2-76) จะเห็นได้ว่าเมื่อหยดน้ำมันมีขนาดเล็กมากความเร็วเฉลี่ยของหยดน้ำมันจะเท่ากับ  $v_{\max}$  แต่ถ้าหยดน้ำมันใหญ่เต็มท่อความเร็วเฉลี่ยของหยดน้ำมันจะเท่ากับความเร็วเฉลี่ยของน้ำ

ให้  $v_b$  = ความเร็วเฉลี่ยจริง ๆ ของหยดน้ำมัน

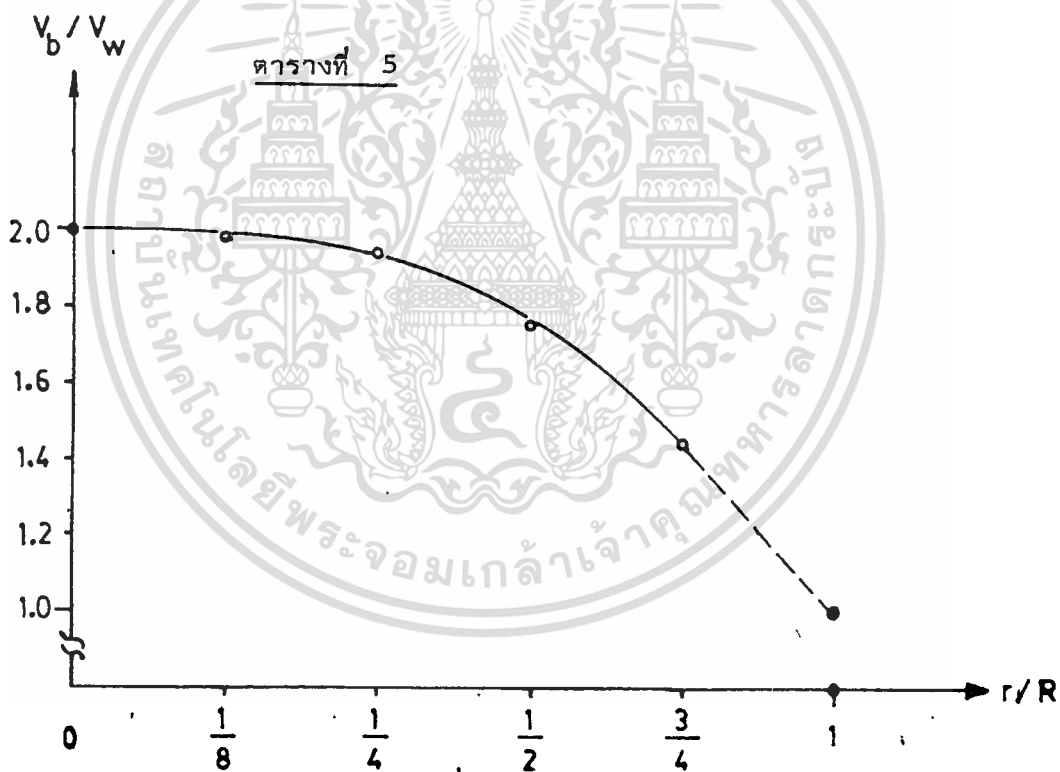
$v'_b$  = ความเร็วเฉลี่ยของหยดน้ำมันที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore V_b = KV_b', \quad K = \text{correction factor} \quad (2-77)$$

$r/R$	1/8	1/4	1/2	3/4
$V_b/V_w$	1.98	1.94	1.75	1.44
Error (%) (ถ้าใช้ $V_b$ เป็น $V_w$ )	98.43	93.75	75	43.75
Correction Factor (K)	0.504	0.516	0.571	0.7



#### 2.4 การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพชั่วขณะ (Instantaneous Efficiency)

$$\eta_i = \frac{\text{พลังงานความร้อนที่แผ่รังสีรับได้}}{\text{พลังงานความร้อนที่ตกกระทบแผ่รังสีในขณะนั้น}} \quad (2-78)$$

$$= \frac{\dot{m} C_p \Delta T}{(H_t A_c)} \quad (2-79)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

### บทที่ 3 หลักการวัดและอุปกรณ์ที่ใช้วัด

#### 3.1 หลักการวัด

การวัดอัตราการไหลของมวลของน้ำ ( $\dot{m}$ ) ในท่อ ต้องทราบ

1. อัตราการไหลแบบปริมาตรของน้ำ ( $Q$ ) ซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของท่อ ( $A$ ) และความเร็วของน้ำ ( $V$ ) พื้นที่หน้าตัดของท่อสามารถวัดและคำนวณได้ ถ้าวัดความเร็วของน้ำได้ ก็จะสามารถคำนวณหาอัตราการไหลแบบปริมาตรได้

2. ความหนาแน่นของน้ำ ( $\rho$ ) ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ถ้าทราบอุณหภูมิ ก็สามารถหาค่าความหนาแน่นของน้ำได้จากตารางคุณสมบัติของน้ำ (ดูภาคผนวกที่ 2)

ในการวัดความเร็วของน้ำในท่อ จากการทดลองของ Ong [4] ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 1 จะเห็นได้ว่า ความเร็วที่วัดได้ไม่ถูกต้องนัก เนื่องจากหยดสีที่ใช้มีการแพร่กระจายไปพร้อมกันกับการเคลื่อนที่ตามน้ำ ขนาดของหยดสีจึงเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยที่ส่วนหน้าของหยดสีจะเกิดจากการเสริมของความเร็วในการไหล และความเร็วในการแพร่ ส่วนหลังของหยดสีจะเกิดจากการหักล้างกันของความเร็วทั้งสอง เพื่อที่จะยืนยันผลอันนี้ จึงใช้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจับสัญญาณไฟฟ้าเมื่อสีเคลื่อน (ใช้ค่างทับทิม) ผ่านจุดที่ต้องการวัด (ดูบทที่ 4)

ถ้าสามารถหาสารซึ่งมีคุณสมบัติไม่แพร่กระจายในน้ำมาใช้แทนสีได้ และเปลี่ยนจากการใช้นาฬิกาจับเวลาแบบการทดลองของ Ong มาเป็นการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จับเวลา ก็ควรจะได้อัตราความเร็วที่ถูกต้องมากขึ้น (ดูผลการทดลองในบทที่ 4)

สารที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติดังนี้

1. ไม่ละลายน้ำ
2. ความถ่วงจำเพาะประมาณความถ่วงจำเพาะของน้ำ
3. อัตราการเปลี่ยนแปลงของความถ่วงจำเพาะต่ออุณหภูมิมีค่าต่ำ

4. ทึบแสง
5. จุดเดือดสูงกว่า  $100^{\circ}\text{C}$
6. ไม่ทำปฏิกิริยากับทองแดง, เหล็ก, พลาสติก, PVC, ยาง, แก้ว และวัสดุอื่น ๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์
7. ไม่เป็นอันตรายต่อชีวิต

เนื่องจากไม่พบสารเคมีตัวใดตัวหนึ่ง ที่มีคุณสมบัติครบทั้งหมด จึงต้องผสมสารหลายชนิดเข้าด้วยกัน กล่าวคือ

1.  $\text{CCl}_4$  + Black KIWI + น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว (ขององค์การเชื้อเพลิง ป.ต.ท.)
2.  $\text{CCl}_4$  + Black KIWI + น้ำมันดีเซลหมุนช้า (ขององค์การเชื้อเพลิง ป.ต.ท.)
3.  $\text{CCl}_4$  + Black KIWI + น้ำมันหล่อลื่น TALPA 30 (ของบริษัท Shell)
4.  $\text{CCl}_4$  + Black KIWI + น้ำมันหล่อลื่น VITREA 220 (ของบริษัท Shell)

สารผสมทั้ง 4 ชนิดนี้ ต่อไปจะเรียกว่า "น้ำมันผสม" ชนิดที่ 1, 2, 3 และ 4

ตามลำดับ

การผสมสารต่าง ๆ ให้ได้อัตราส่วนที่เหมาะสม จะทำให้ได้น้ำมันผสมที่มีคุณสมบัติที่ต้องการ (ดูภาคผนวกที่ 1)

การที่ต้องใช้น้ำมันผสมหลายชนิดระหว่างการทดลอง ก็เพราะว่า แต่ละชนิด ความหนืดไม่เท่ากัน ซึ่งจะใช้กับความเร็วของการไหลของน้ำที่ต่างกัน เพื่อควบคุมขนาดหยดน้ำมัน ให้เท่ากันตลอดช่วงความเร็วที่ต้องการวัด

(น้ำมันผสมชนิดที่ 1-4 เรียงลำดับความหนืดจากน้อยมาหามาก ใช้กับความเร็วของการไหลของน้ำ ตั้งแต่ความเร็วต่ำจนถึงความเร็วสูง)

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้วัด

#### 3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วน้ำ

จากรายงานการทดลองที่ผ่านมา [4,5,7-11] ได้กล่าวถึงแล้วในบทที่ 1 ความเร็วของน้ำในท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน = 2.25 ซม. และมีการไหลแบบเทอร์โมไซฟอน (thermosyphon) จะอยู่ในช่วง 0-4.3 cm/sec (โดยประมาณ) ดังนั้นในการออกแบบอุปกรณ์การวัดจึงต้องครอบคลุมความเร็วในช่วง 0-4.3 cm/sec ด้วย

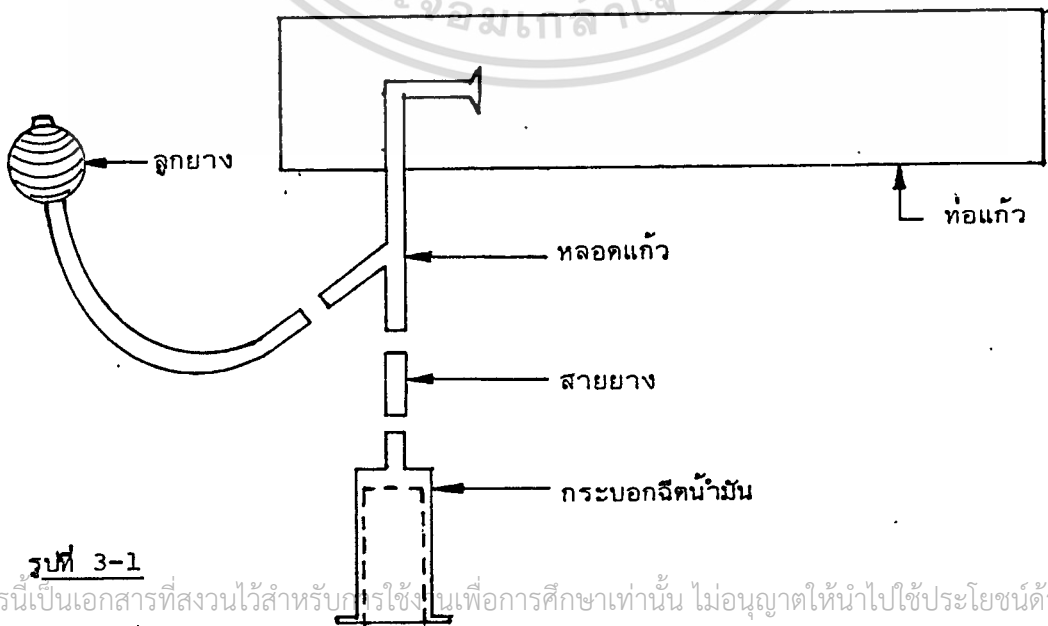
อุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วน้ำ แบ่งออกเป็นส่วนใหญ่ ๆ 3 ส่วน คือ

1. ชุดฉีดหยดน้ำมัน
2. แหล่งกำเนิดแสง และชุดตรวจจับ (detector)
3. อุปกรณ์จับเวลาอิเล็กทรอนิกส์

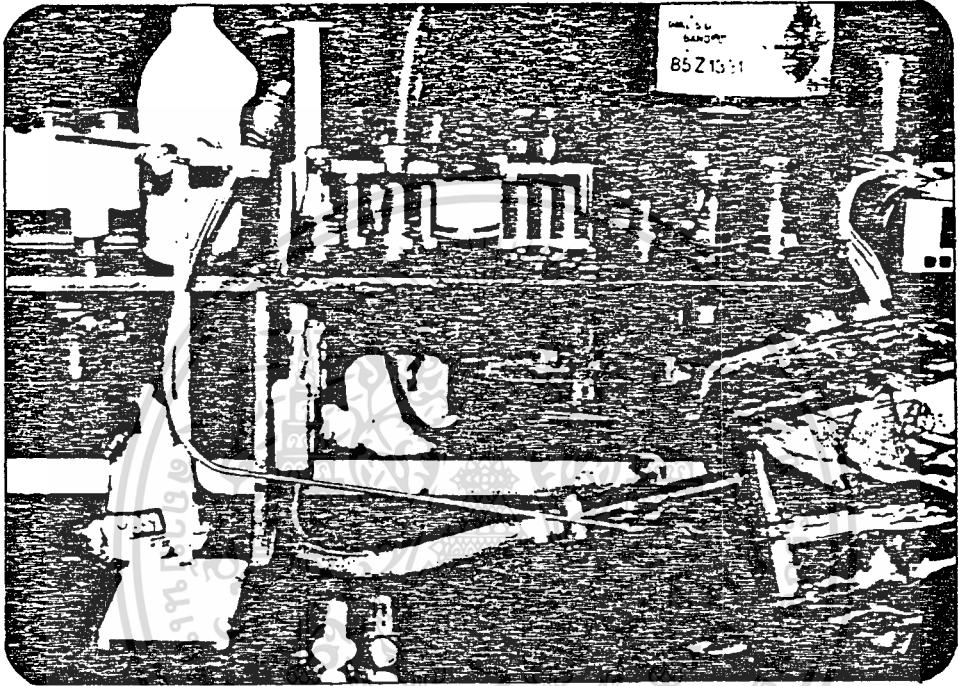
##### 3.2.1-1 ชุดฉีดหยดน้ำมัน

ประกอบด้วยท่อแก้ว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (I.D.) = 2.25 ซม.

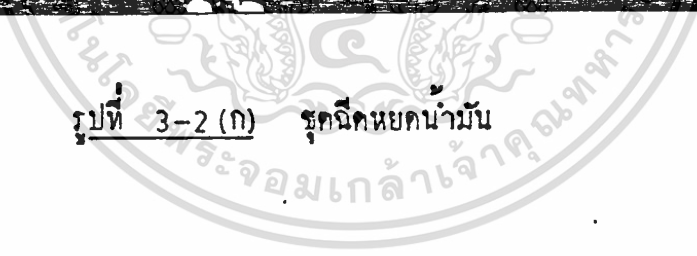
เชื่อมและกระบอกฉีดน้ำมัน ลูกยางควบคุมขนาดหยดน้ำมัน

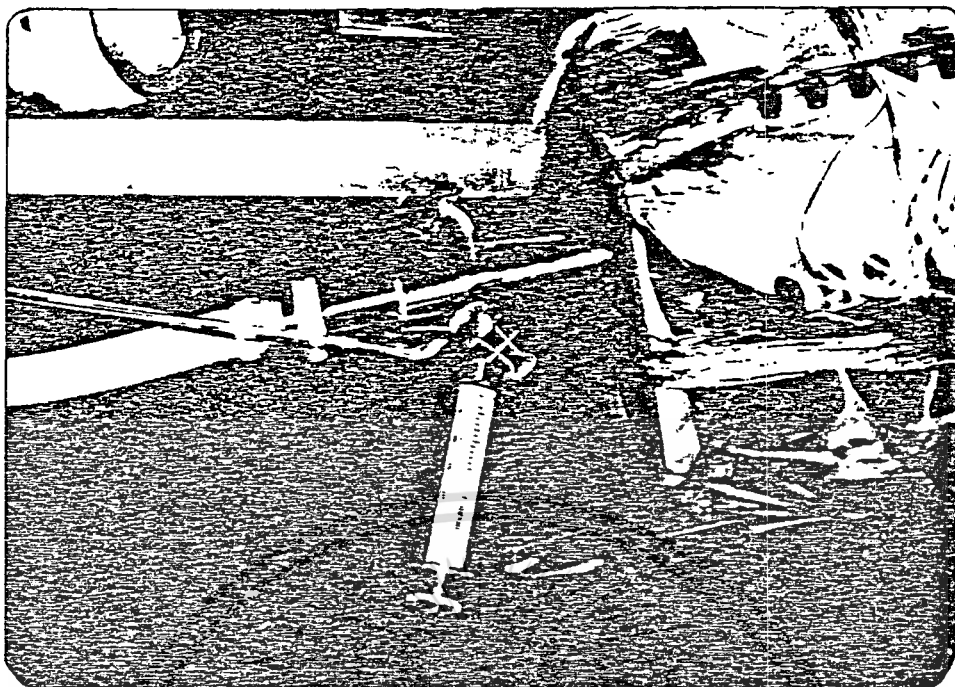


รูปที่ 3-1

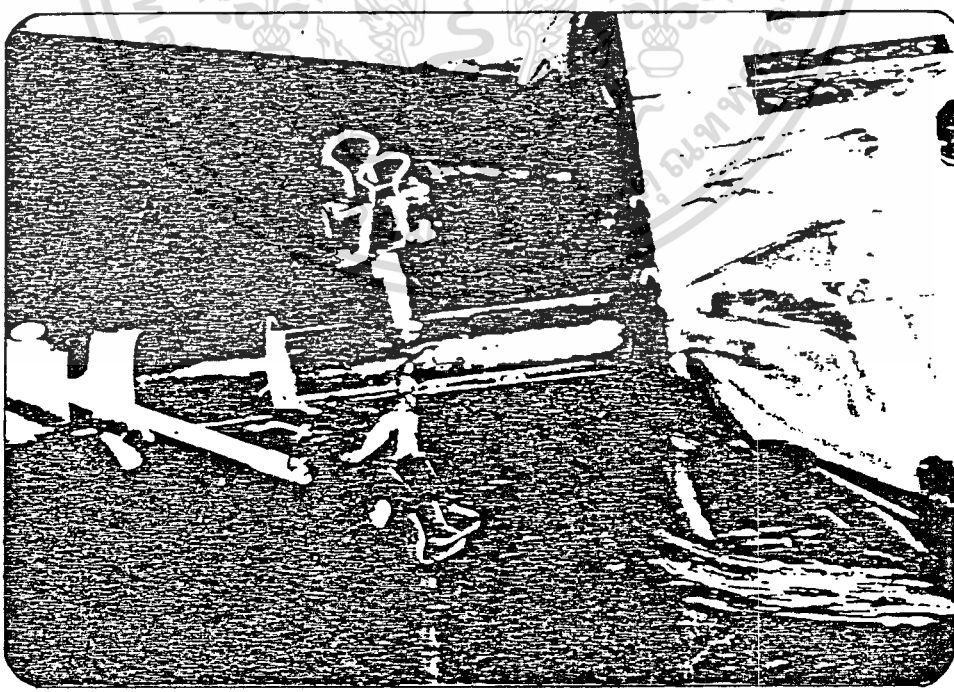


รูปที่ 3-2 (ก) ชุดนึ่งหยคน้ำมัน





รูปที่ 3-2 (ข) ชุกฉีกหยกน้ำมัน



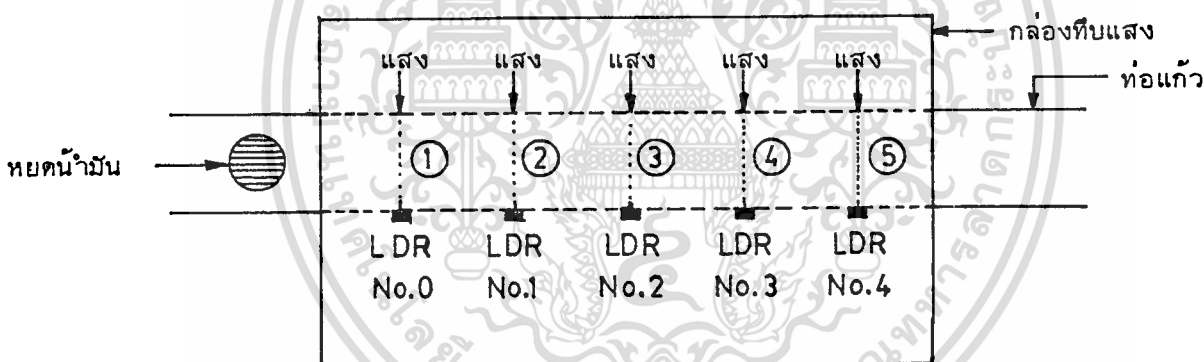
รูปที่ 3-2 (ค) ชุกฉีกหยกน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

(ดูรายละเอียดและการออกแบบในภาคผนวกที่ 1)

ชุดฉีดหยดน้ำมันนี้ จะทำหน้าที่ฉีดน้ำมันผสม เข้าไปอยู่ตรงกลางท่อให้เป็นหยดกลม ๆ (โดยการใช้กระบอกเข็มฉีดยา) ตามขนาดที่ต้องการ (โดยการใช้ลูกยางบีบลมควบคุม) ในการฉีดน้ำมันผสม ต้องดันน้ำมันผสม เข้าไปในท่อแก้วเล็ก ๆ ด้วยจำนวนที่เหมาะสม แล้วใช้ลูกยางบีบให้หยดน้ำมันหลุดออกไปอย่างเบา ๆ (เพื่อไม่ให้อัตราการไหลของน้ำเปลี่ยนไป) หยดน้ำมัน (ถ.พ.  $\cong$  1) จะหลุดลอยไปตรงกลางท่อแก้ว ไปยังชุดตรวจจับ

### 3.2.1-2 แหล่งกำเนิดแสงและชุดตรวจจับ



รูปที่ 3-3

การวัดความเร็วของน้ำ ทำได้โดยการวัดเวลาที่หยดน้ำมันใช้ในการเคลื่อนที่ระหว่างจุดต่าง ๆ ในทิศทางการไหลของน้ำโดยรู้ระยะห่างระหว่างจุดนั้น ๆ โดยปล่อยให้หยดน้ำมันเคลื่อนที่ไปพร้อมกับน้ำในหลอดแก้วใส ซึ่งด้านหนึ่งมีแหล่งกำเนิดแสง ส่วนด้านตรงข้ามมีตัวตรวจจับแสง โดยอุปกรณ์ทั้งหมดอยู่ในกล่องทึบแสง เพื่อตัดแสงรบกวนภายนอก

แหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดทังสแตน [47] และมี slit ด้านหน้า เพื่อบังคับให้แสงผ่านเป็นแนวตรงผ่านท่อแก้วไปยังตัวตรวจจับแสง ซึ่งเป็น LDR (Light Dependent Resistor) ทำจาก CdS เมื่อมีหยดน้ำมันไหลผ่าน LDR ความเข้มของแสงที่ตกกระทบบน LDR จะเปลี่ยนไป ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้า เนื่องจากการเปลี่ยนความต้านทานของตัว LDR ไปกระตุ้นให้นาฬิกาจับเวลาทำงานได้ จากเวลาที่จับได้ระหว่างระยะทางหนึ่ง ๆ นำมาคำนวณหาความเร็วของหยดน้ำมันได้ จากความเร็วของหยดน้ำมันสามารถทราบความเร็วเฉลี่ยของน้ำที่ไหลในท่อได้ (ดูการวิเคราะห์ในบทที่ 4)

ในการทดลอง มีตำแหน่งตรวจจับ 5 จุด และกำหนดให้ระยะห่างระหว่างจุดตรวจจับเท่ากับ 5 ซม. เมื่อมีหยดน้ำมันเคลื่อนที่ผ่านจุดที่ 1 จะมีสัญญาณจ่ายให้นาฬิกา 4 ตัว เริ่มจับเวลาพร้อมกัน เมื่อผ่านจุดที่ 2 นาฬิกาตัวที่ 1 จะหยุด เมื่อผ่านจุดที่ 3 นาฬิกาตัวที่ 2 จะหยุด เมื่อผ่านจุดที่ 4 นาฬิกาตัวที่ 3 จะหยุด และเมื่อผ่านจุดที่ 5 นาฬิกาตัวที่ 4 จะหยุด จะได้เวลา 4 ค่า ซึ่งเป็นเวลาที่จับได้ เมื่อหยดน้ำมันเคลื่อนที่ไป 5, 10, 15 และ 20 ซม. นำมาคำนวณหาความเร็วของหยดน้ำมันได้ 4 ค่า แล้วนำมาหาค่าความเร็วเฉลี่ย

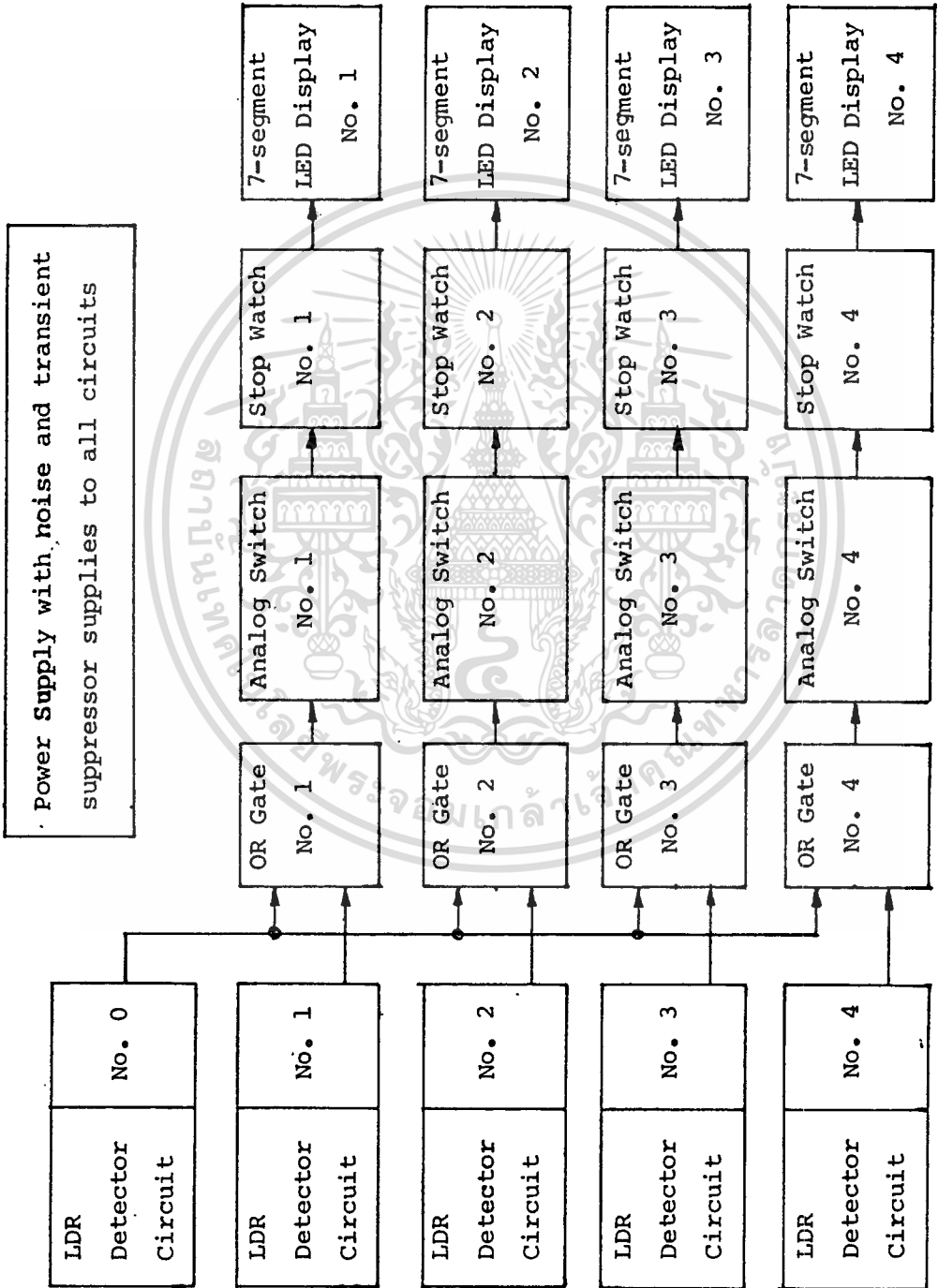
การที่ต้องจับเวลาที่ระยะทางต่าง ๆ แล้วหาค่าความเร็วเฉลี่ยก็เพราะว่า ถ้าหยดน้ำมันมีขนาดใหญ่ไม่เต็มท่อ เมื่อไหลไปตามน้ำจะเคลื่อนที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรงในบางครั้ง นอกจากนี้ถ้าหยดน้ำมันกระเพื่อม จะทำให้นาฬิกาจับเวลารวนได้

การควบคุมขนาดหยดน้ำมันให้ใหญ่เต็มท่อตลอดช่วงความเร็วที่ต้องการทำได้ยาก จึงต้องออกแบบชุดตรวจจับ คือ LDR ให้เหมาะสม ทั้งนี้เพราะว่า LDR มีขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับขนาดของท่อแก้ว เพื่อให้จะให้เครื่องมือทำงานได้ไม่ว่าหยดน้ำมันจะมีขนาดเท่าไรก็ตาม (แต่ต้องไม่เล็กกว่า LDR แต่ละตัว ควรจะมีขนาดใหญ่อย่างน้อยเป็น 2 เท่าของ LDR แต่ละตัว ทั้งนี้เพราะว่าหยดน้ำมันอาจจะไม่ไหลผ่าน LDR ตัวใดตัวหนึ่งเต็มที่แค่เพียงตัวเดียว) จึงต้องใช้

LDR ต่อกันเป็นเส้นตรงในแนวตั้งฉากกับทิศของการไหล โดยที่ LDR แต่ละตัวสามารถมองเห็นแสงที่ผ่าน LDR ได้ ถ้า LDR ตัวใดตัวหนึ่งไม่ได้รับแสง จะทำให้ค่าความต้านทานสูง เมื่อมีหยดน้ำมันไหลผ่านชุด LDR จะทำให้ค่าความต้านทานรวมเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย จึงทำให้การเปลี่ยนของศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมชุด LDR ไม่มากพอที่จะทำให้อุปกรณ์จับเวลาฮิลเลทโรนิกส์ทำงานได้ ดังนั้นสิ่งที่ต้องการคือ การเปลี่ยนค่าความต้านทานของชุด LDR ที่มีช่วงกว้าง คือ เมื่อชุด LDR ได้รับแสง จะมีค่าความต้านทานต่ำ และเมื่อไม่ได้รับแสง จะมีค่าความต้านทานสูง (ในการทดลองใช้ชุดของ LDR 5 ตัว และ 7 ตัว เปรียบเทียบผลการทดลอง ปรากฏว่าชุด LDR 5 ตัว ทำงานได้ผลดีกว่า สำหรับท่อแก้วที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (I.D.) = 2.25 ซม. และมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (O.D.) = 2.5 ซม. มีความหนา = 0.125 ซม. ค่าทั้งหมดเป็นค่าโดยประมาณ ขนาดของ LDR ที่ใช้ในภาคผนวกที่ 2)

3.2.1-3 อุปกรณ์จับเวลาอิเล็กทรอนิกส์

มีภาคต่าง ๆ ของเครื่องมือ ดังรูปที่ 3.4



## 1. LDR Detector Circuit

เป็นวงจรโมโนสเตเบิล ที่ใช้ ICM 7555 IPA (CMOS ของบริษัท Intersil) ซึ่งมีคาบเวลา T ประมาณ 50 msec (ดูภาคผนวกที่ 1) วงจรจะกระทำเมื่อได้รับสัญญาณไฟฟ้า จากชุด LDR ซึ่งจะทำงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงที่ตกกระทบ

## 2. OR Gate

ทำหน้าที่เลือกสัญญาณ ที่ได้รับจาก LDR Detector Circuit เพื่อป้อนให้กับ Analog Switch ใช้ CMOS เบอร์ 4071

## 3. Analog Switch

ทำหน้าที่เปิด-ปิด นาฬิกาจับเวลา ตามสัญญาณที่ได้รับจาก OR Gate ใช้ CMOS เบอร์ 4066

## 4. Stop Watch

ทำหน้าที่จับเวลา ตามสัญญาณที่ได้รับจาก Analog Switch ใช้ ICM 7215 IPG (CMOS ของบริษัท Intersil) จับเวลาได้ตั้งแต่ 0.01 วินาที ถึง 59 นาที 59.99 วินาที โดยมีความละเอียดถึง  $\frac{1}{100}$  วินาที

## 5. 7-segment LED Display

แสดงเวลาที่จับได้-เป็นตัวเลขแบบ digital

## 6. Power Supply

ทำหน้าที่จ่ายไฟ +4 Volts ให้กับทุกภาคยกเว้นภาคแสดงผล เหตุผลที่ต้องจ่ายไฟแค่ +4 Volts ก็เพราะว่า ICM 7215 IPG ทนแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ 5 Volts เมื่อ

+4 V IC ก็มีอุณหภูมิกติ (เท่ากับอุณหภูมิกติ) วงจรนี้ใช้ IC Regulator เบอร์ LM 317 ซึ่งสามารถปรับค่าแรงดันได้

นอกจากนี้ต้องมีวงจร Noise and Transient (Voltage Spike) Suppressor เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนที่มาจากแหล่งกำเนิด เช่น มอเตอร์ หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ และเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่น ๆ ซึ่งจะทำให้หน้าผกาจับเวลาทำงานผิดปกติ

วงจร Transient (Voltage Spike) Suppressor จะกำจัดสัญญาณรบกวนที่เข้ามาตามสายไฟ 220 V (AC)

ส่วนการกำจัดสัญญาณรบกวน ที่เรียกว่า Noise Interference ซึ่งมาในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นวิทยุ และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นพัลส์ ทำได้โดยการผ่านวงจรกรองสัญญาณ ซิลิทรานฟอรัมเมอร์ กล้องใส่วงจร และสายต่าง ๆ ที่จำเป็น

(ดูรายละเอียด สาเหตุของสัญญาณรบกวนและวิธีแก้ไขในภาคผนวกที่ 1)

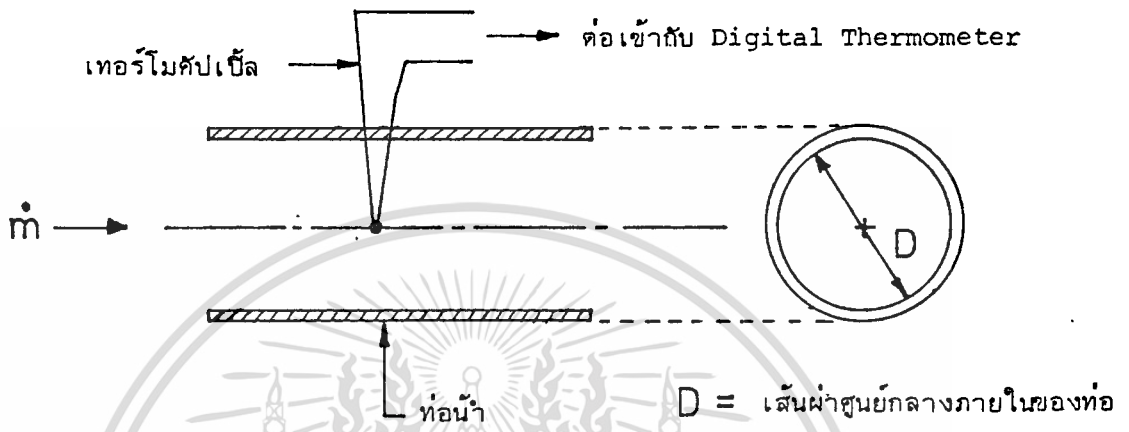
การใช้ IC ในวงจรต่าง ๆ เป็นพวกตระกูล CMOS ทั้งหมด ก็เพื่อตัดปัญหาเรื่องการ interface ระหว่างภาคต่าง ๆ ออกไป และหลีกเลี่ยงการใช้แหล่งจ่ายไฟหลายชุด หลายระดับค่าแรงดัน นอกจากนี้ IC ตระกูล CMOS ยังกินกระแสต่ำมาก (เป็น  $\mu\text{A}$ ) ซึ่งจะทำให้ประหยัดพลังงานอีกด้วย

### 3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิ

ใช้เทอร์โมคัปเปิล แบบ K (Chromel-Alumel) ของบริษัท Omega Engineering, Inc. [48] กับ Digital thermometer ของบริษัท YEW รุ่น 2809 โดยยึดถือมาตรฐานอเมริกัน [49]

ในการวัดอุณหภูมิของน้ำในท่อใช้เทอร์โมคัปเปิล จุ่มลงไปกลางท่อ ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



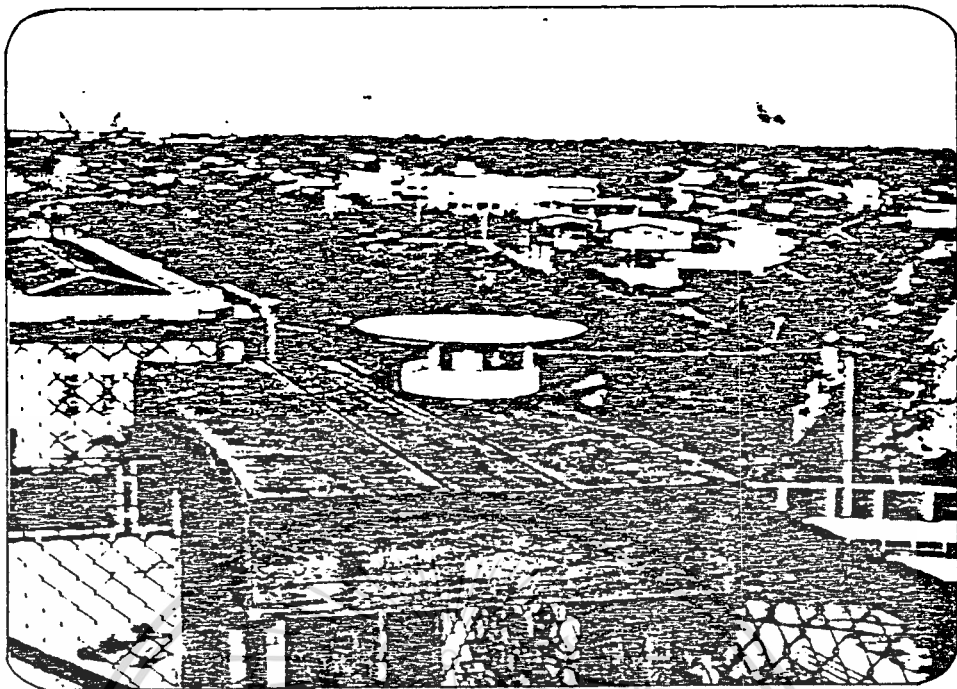
รูปที่ 3-5

ส่วนการวัดอุณหภูมิแวดล้อม วัดในตำแหน่งที่ไม่โดนแสงอาทิตย์โดยตรงคือวัดในร่ม

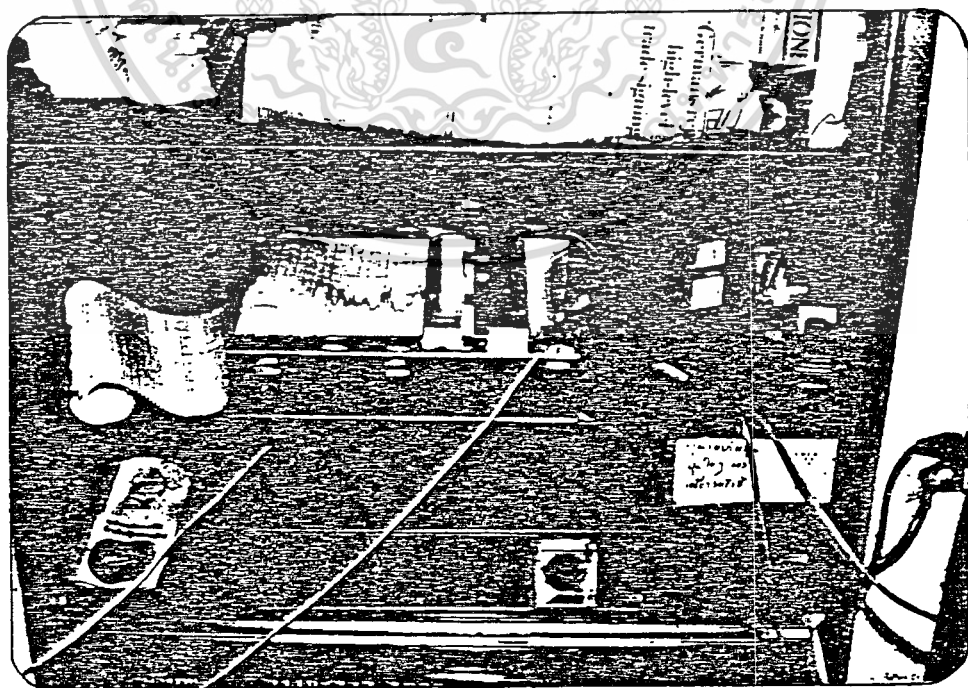
### 3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้วัดรังสีดวงอาทิตย์

ใช้เครื่องมือของบริษัท KIPP & ZONEN ดังนี้

1. Solarimeter model CM-5
2. Two-Channel Recorder model BD9
3. Solarimeter Integrator model CCl



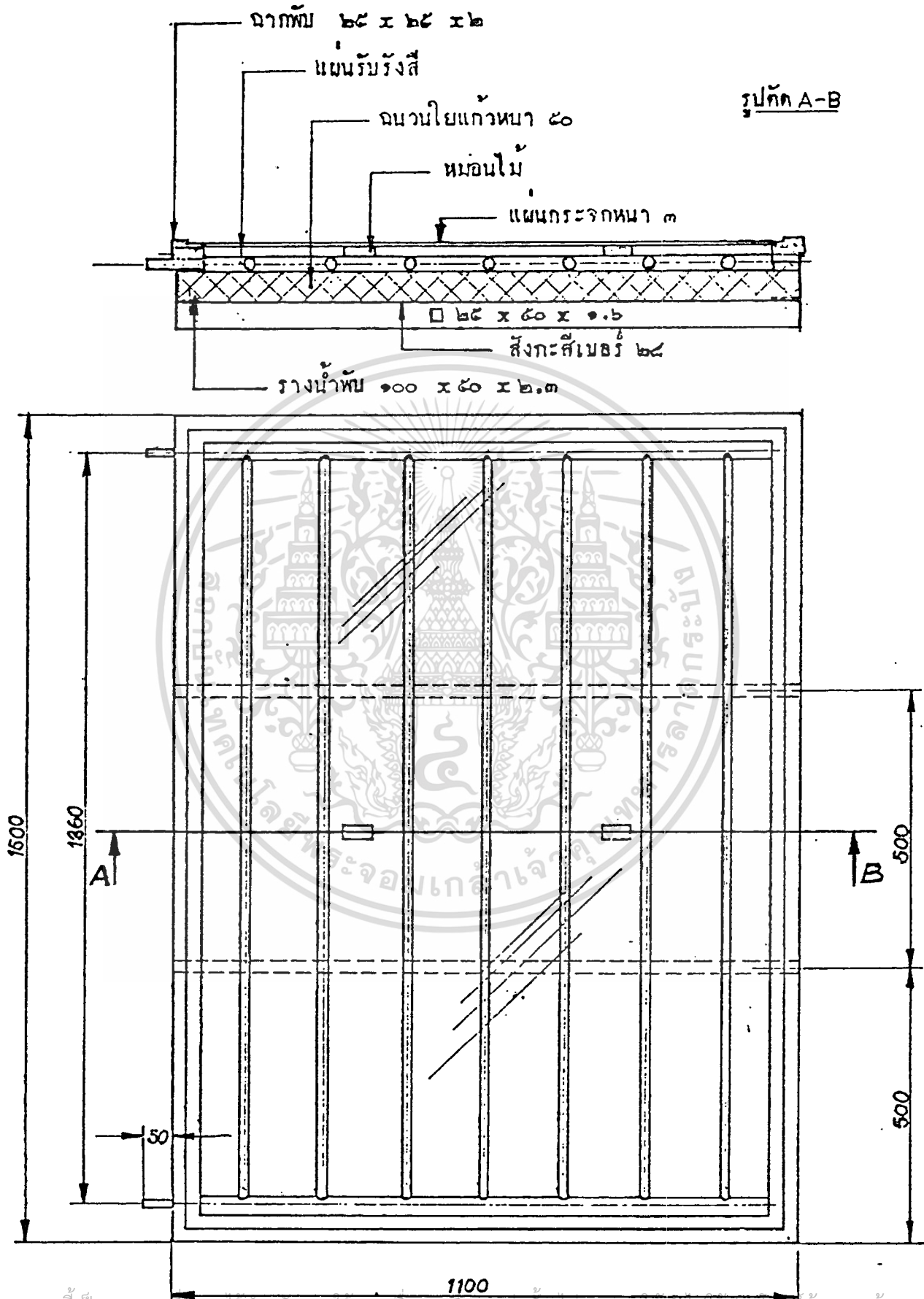
รูปที่ 3-6 Solarimeter model CM-5



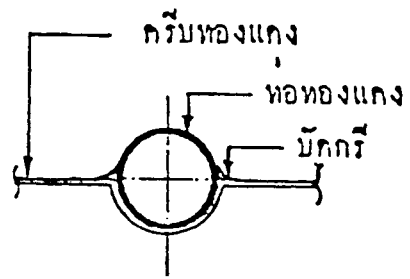
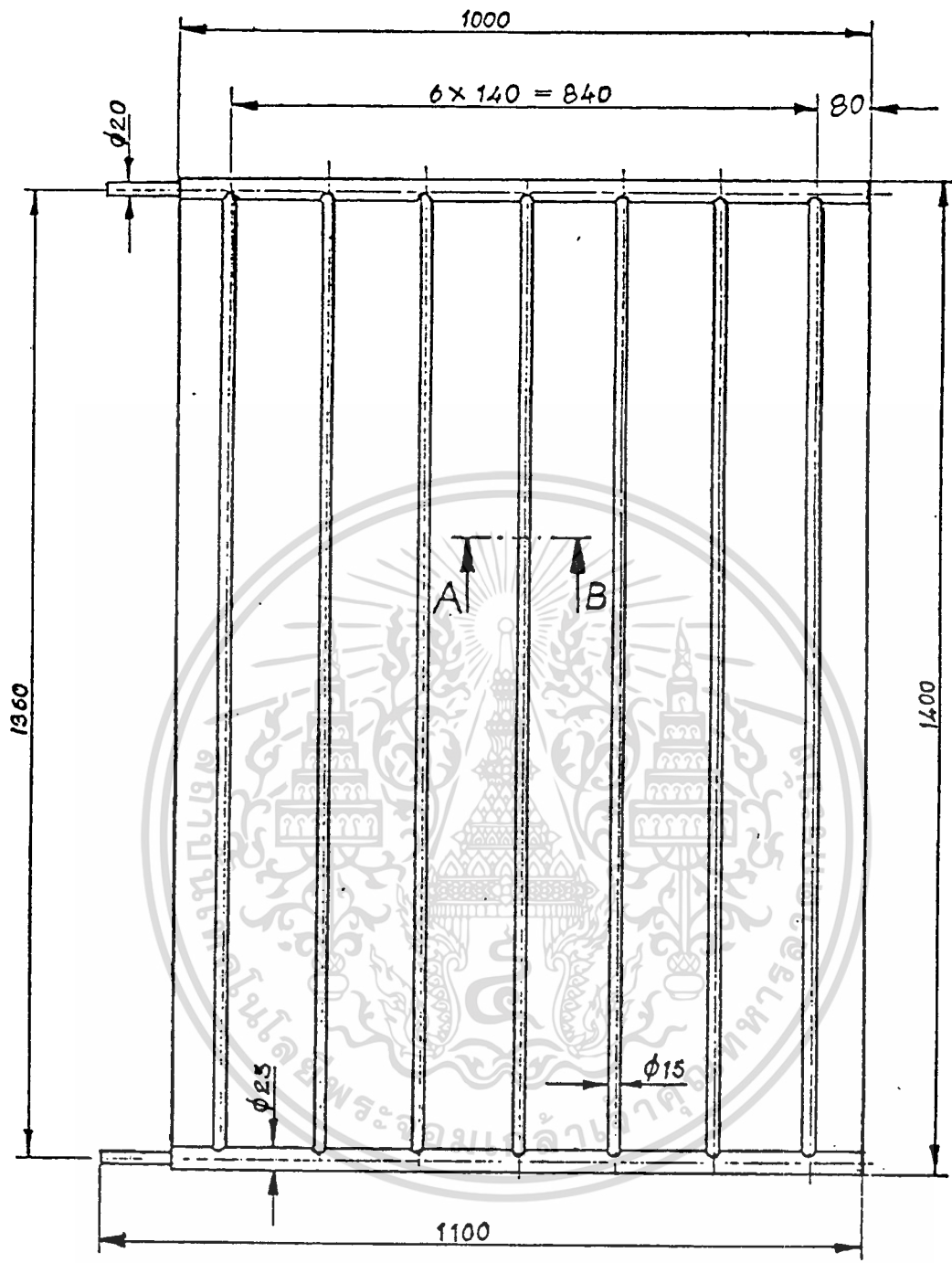
รูปที่ 3-7 Two-Channel Recorder model ED 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องขออนุญาตก่อนนำเอกสารทุกชิ้นที่กล่าวมาไปใช้

Solarimeter Integrator model CC 1



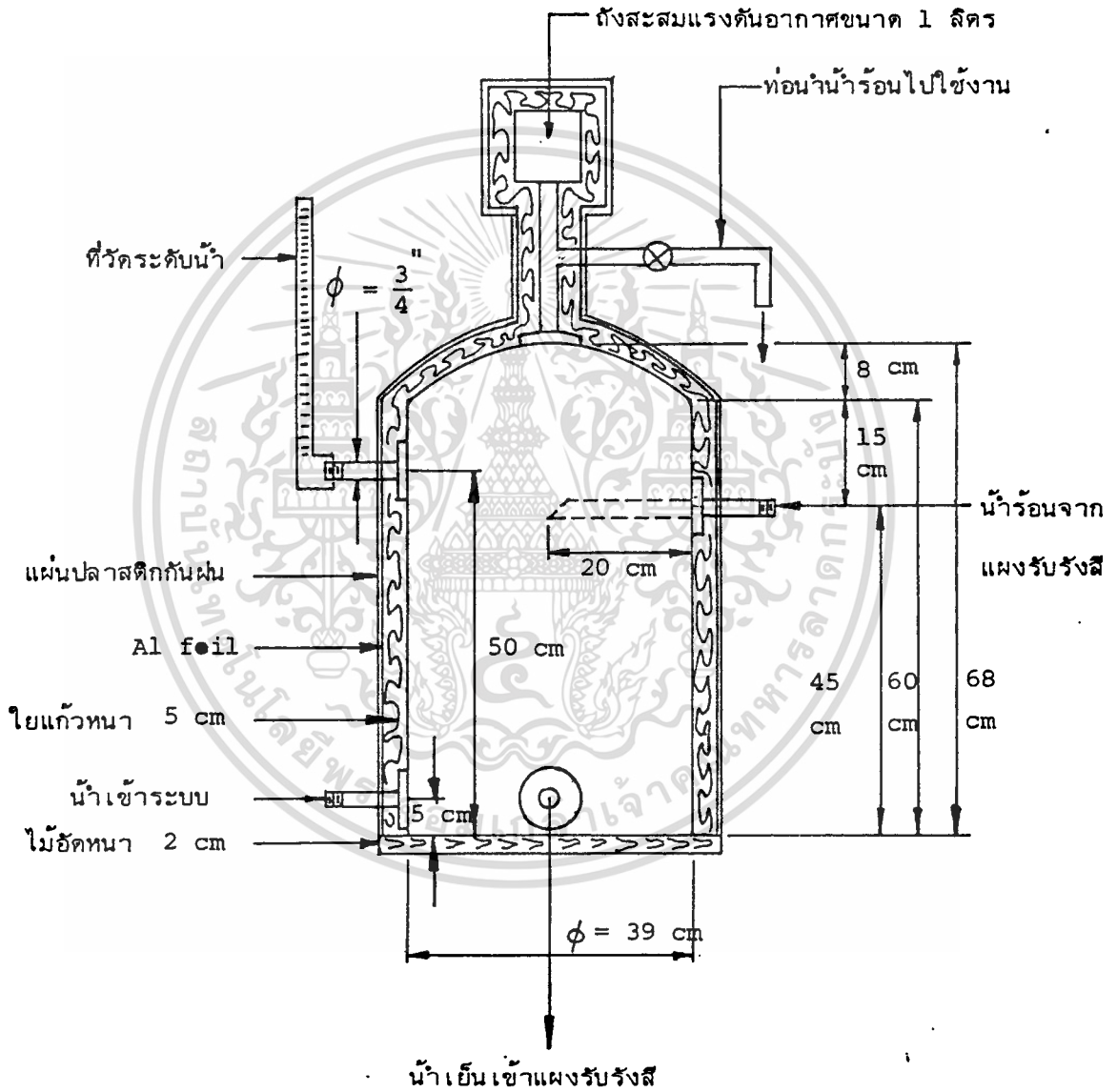
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



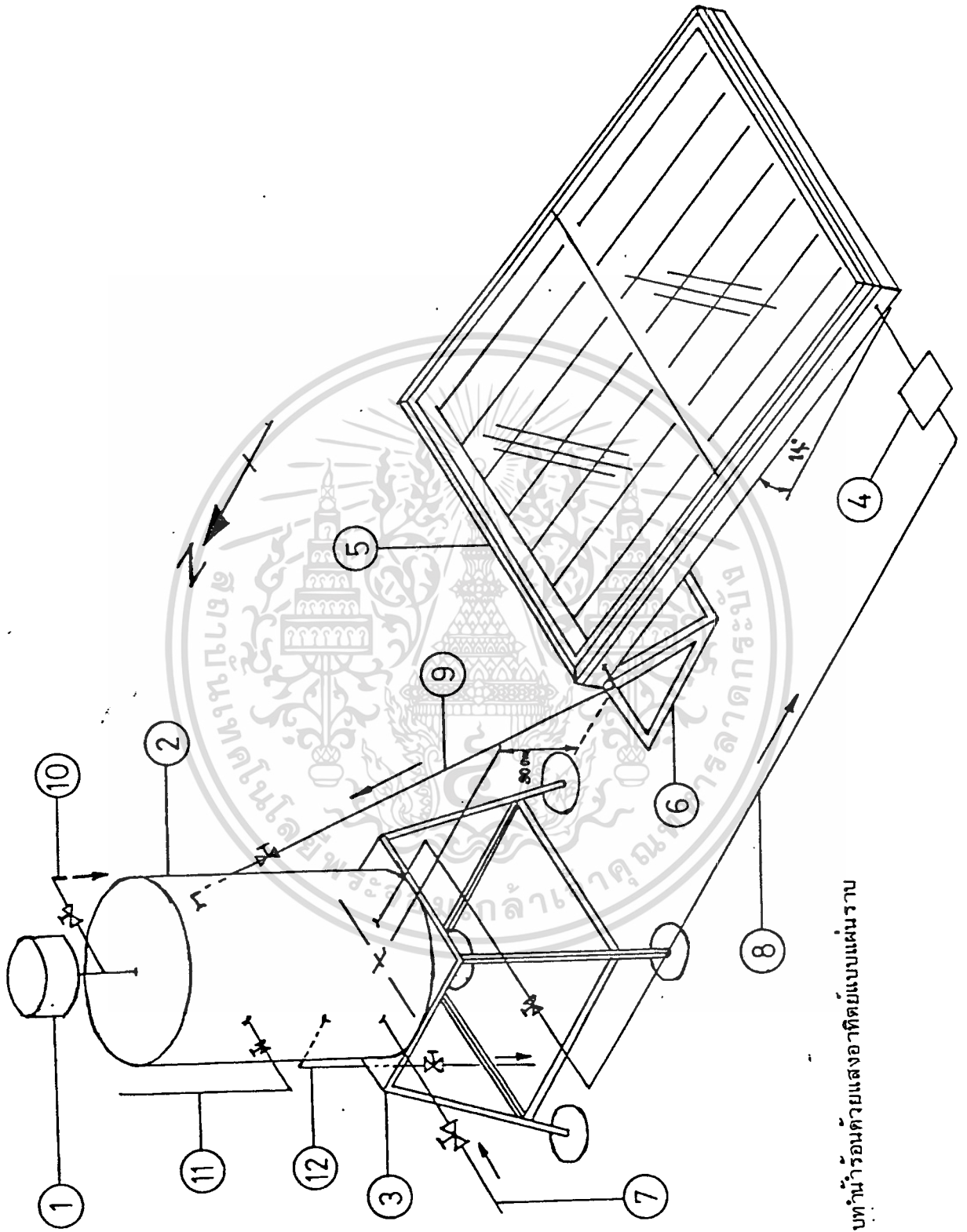
រូបគិត A-B

ถังสะสมน้ำร้อนขนาด 75 ลิตร

ใช้ stainless steel ทนหนา 1.5 มม.



รูปที่ 3-10 ถังสะสมน้ำร้อน



รูปที่ 3-11 ระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์แบบแผ่นรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำอธิบายของรูปที่ 3-11

- 1 = ถังสะสมแรงดัน (ขนาด 1 ลิตร)
- 2 = ถังสะสมน้ำร้อน (ขนาด 75 ลิตร)
- 3 = โครงรองรับถังสะสมน้ำร้อน
- 4 = จุดที่วัดอัตราการไหลของน้ำในระบบ
- 5 = แผงรับรังสีแบบแผ่นราบ
- 6 = โครงรองรับแผงรับรังสี
- 7 = ท่อน้ำเย็นเข้าระบบ
- 8 = ท่อน้ำเย็นเข้าแผงรับรังสี
- 9 = ท่อน้ำร้อนออกจากแผงรับรังสี
- 10 = ท่อน้ำร้อนไปใช้งาน
- 11 = ที่วัดระดับน้ำในถัง
- 12 = ท่อระบายน้ำทิ้ง

## บทที่ 4 การทดลองและการวิจารณ์

### 4.1 การทดลองเบื้องต้น

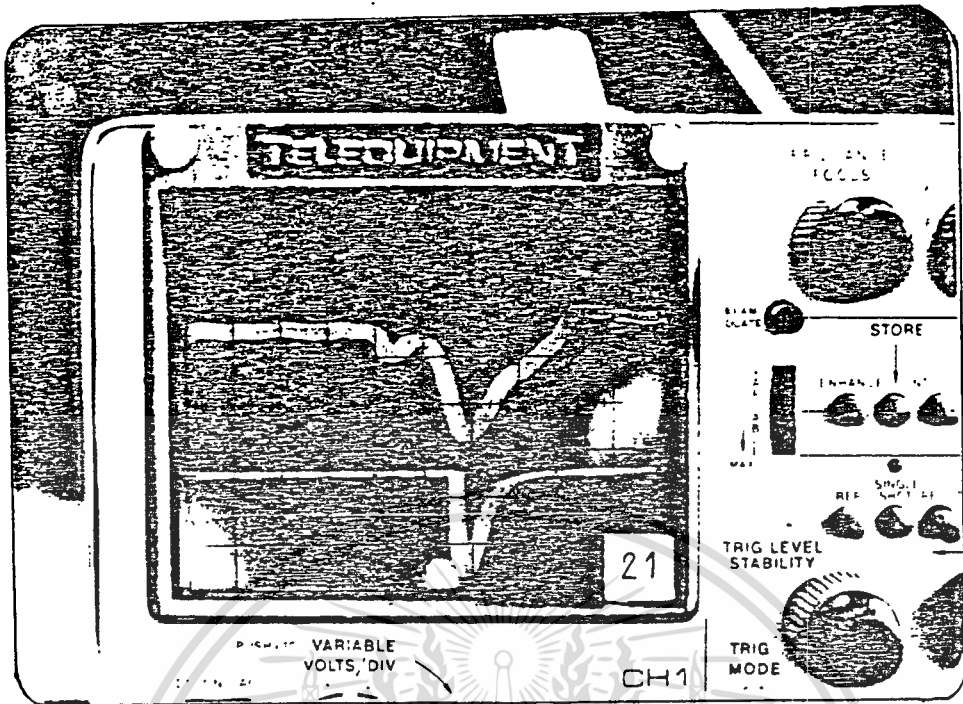
เนื่องจากได้กล่าวแล้วว่าการวัดอัตราการไหลของมวลของน้ำตามแบบของ Ong (ในบทที่ 1) ให้ผลไม่ถูกต้องนัก เพราะความไม่แน่นอนเนื่องจากการกระจายของสี เพื่อเป็นการยืนยัน จึงได้ทดลองตามวิธีของ Ong โดยการใช้การฉีดต่างหับทิมซึ่งมีความหึบ-มาก เข้าไปในท่อแก้ว แล้วจับสัญญาณไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นเมื่อ

ก. สีเคลื่อนที่ผ่านชุด LDR ซึ่งทำหน้าที่จับสิ่งที่ไหลผ่านไปตามน้ำในท่อ โดยที่ช่วงเวลาของสัญญาณที่ปรากฏจะเท่ากับเวลาที่หยดสีเคลื่อนที่ผ่านชุด LDR

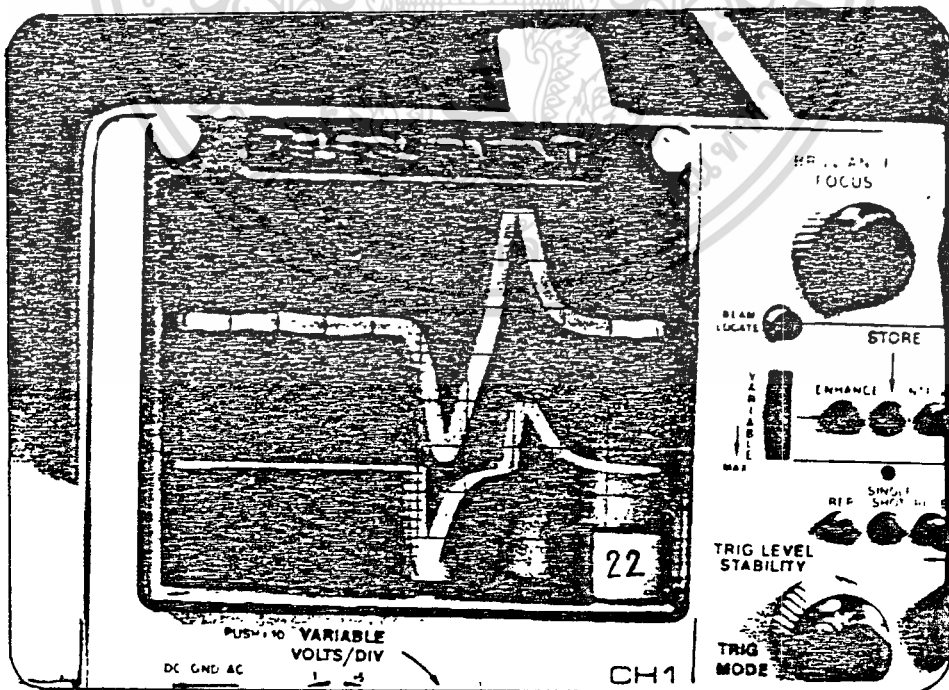
ข. นาฬิกาจับเวลาเริ่มทำงาน

เปรียบเทียบผลที่ได้กับการใช้หยคน้ำมันผสมแทนค่างหับทิม ดังรูปที่ 4.1 และ

4.2



รูปที่ 4-1 สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากการฉีกค่างทับทิม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ประกอบการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

จากรูปที่ 4.1 ทั้งกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 แสดงว่าการจับเวลาการเคลื่อนที่ของหยดสีโดยวิธีของ Ong นั้นจะเกิดความผิดพลาดได้มาก โดยพิจารณาได้จากช่วงเวลาที่หยดสีใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านชุด LDR (ดูได้จากความกว้างของสัญญาณใน upper trace) เป็นการยากที่จะกำหนด reference time marker ลงที่จุดหนึ่งจุดใดในช่วงเวลาดังกล่าว

ถ้าใช้สัญญาณดังกล่าวเป็นตัวกระตุ้นให้นาฬิกาจับเวลาทำงานโดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ก็ยังไม่สามารถแก้ความไม่แน่นอนของการวัดได้ เนื่องจาก time delay ระหว่างจุดเริ่มของสัญญาณสี และสัญญาณกระตุ้น จะมีค่าไม่แน่นอนขึ้นกับการกระจายของสีในหยดสี

ยิ่งเมื่อสีเคลื่อนที่ห่างออกไปจากจุดฉีดเท่าใด การกระจายของสีก็จะมากขึ้น การใช้สัญญาณซึ่งสมนัยกับการกระจายของสีไปกระตุ้นนาฬิกาให้ทำงานก็จะไม่แน่นอนยิ่งขึ้น เพราะค่า time delay ระหว่างจุดเริ่มของสัญญาณสี และสัญญาณกระตุ้น จะต่างกันตามตำแหน่งต่าง ๆ

เมื่อใช้หยดน้ำมันผสม ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อหยดน้ำมันผสมเคลื่อนที่ผ่าน LDR ชุดแรก จะไม่มีการกระจายของหยดน้ำมันผสม (ความกว้างของสัญญาณเวลาที่จับได้จะสมนัยกับเวลาซึ่งหยดน้ำมันผสมเคลื่อนที่ผ่าน) นาฬิกาจับเวลาจะทำงานทันที เมื่อเคลื่อนที่ผ่าน LDR ชุดต่อไปก็จะให้ผลเหมือนกัน เนื่องจาก time delay ระหว่างจุดเริ่มของหยดน้ำมันผสม และสัญญาณกระตุ้นในกรณีนี้ถือได้ว่ามีค่าเท่ากันทุกจุด (เพราะไม่มีการกระจายของหยดน้ำมันผสม) ความไม่แน่นอนในการวัดเวลาระหว่างจุดสองจุดจะหมดไป เนื่องจากการหักล้างของค่า time delay ที่เท่ากัน

ข้อที่น่าสังเกต คือ

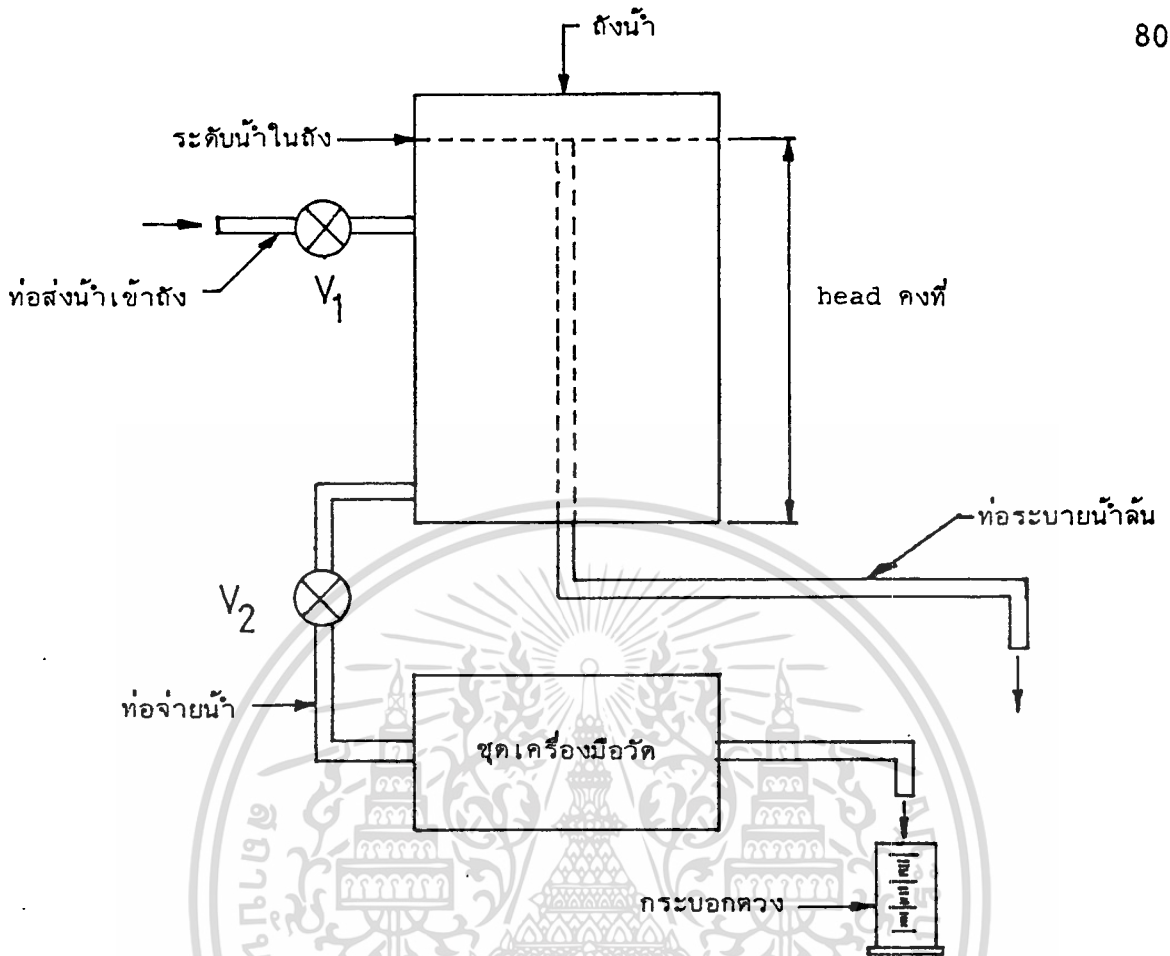
ก. สัญญาณสี หรือหยดน้ำมันผสมจะมีค่ามากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับขนาดของหยดน้ำมันผสม ถ้าหยดใหญ่ก็จะบังแสงที่ตกกระทบชุด LDR มากสัญญาณที่ได้จึงมีค่ามาก แต่ถ้าเป็นหยดเล็กก็บังแสงได้น้อย สัญญาณที่ได้จึงมีค่าน้อย

ข. สัญญาณที่กระตุ้นให้นาฬิกาจับเวลาทำงานเป็นสัญญาณที่กระตุ้นทางลบซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของหยดน้ำมันผสมผ่านเข้าชุด LDR แต่ก็มีสัญญาณที่กระตุ้นทางบวกด้วย เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของหยดน้ำมันผสมออกจากชุด LDR สัญญาณที่กระตุ้นทางลบจะมีขนาดคงที่ไม่ว่าหยดน้ำมันผสมจะมีขนาดเท่าใดก็ตาม ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการ discharge ของ C 50 pF ที่ขา 22 ของ ICM 7215 จากค่า +1V (โดยประมาณ) ผ่าน Analog Switch ลงสู่กราวด์ ช่วงเวลาที่ C 50 pF ใช้ในการ discharge จะมีค่าน้อยเนื่องจากค่า time constant มีค่าน้อยแต่สัญญาณที่กระตุ้นทางบวกจะมีขนาดไม่คงที่ขึ้นอยู่กับเวลาที่ C 50 pF ใช้ในการ charge ซึ่งสัมพันธ์กับเวลาที่หยดน้ำมันผสมเคลื่อนที่ผ่านชุด LDR ด้วย สัญญาณกระตุ้นทางบวกจะไม่ทำให้นาฬิกาจับเวลาทำงานผิดปกติ-ถ้าสัญญาณมีค่าน้อยแต่อาจจะมีปัญหาเมื่อสัญญาณกระตุ้นทางบวกมีค่ามาก (ซึ่งเกิดขึ้นในการวัดความเร็วต่ำประมาณ 1 cm/sec และต่ำกว่า) คือจะทำให้นาฬิกาทำงานผิดพลาดแต่ควรแก้ไขได้โดยการใช้ไดโอดตัดสัญญาณกระตุ้นทางบวกนี้

#### 4.2 การทดสอบเครื่องมือวัดความเร็วน้ำที่สร้างขึ้น

เราทดสอบความถูกต้องของการใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบปริมาตรของน้ำที่สร้างขึ้นโดยทำการวัดอัตราการไหลของน้ำที่รู้ค่า อัตราการไหลนี้ได้จากแหล่งจ่ายน้ำที่สามารถรักษา head ให้คงที่ได้ การเปลี่ยนอัตราการไหลทำได้โดยการปรับประตุน้ำที่ท่อจ่ายน้ำเข้าสู่ชุดเครื่องมือวัด

รูปของเครื่องมือแสดงไว้ดังรูปที่ 4-3 ถึง 4-5



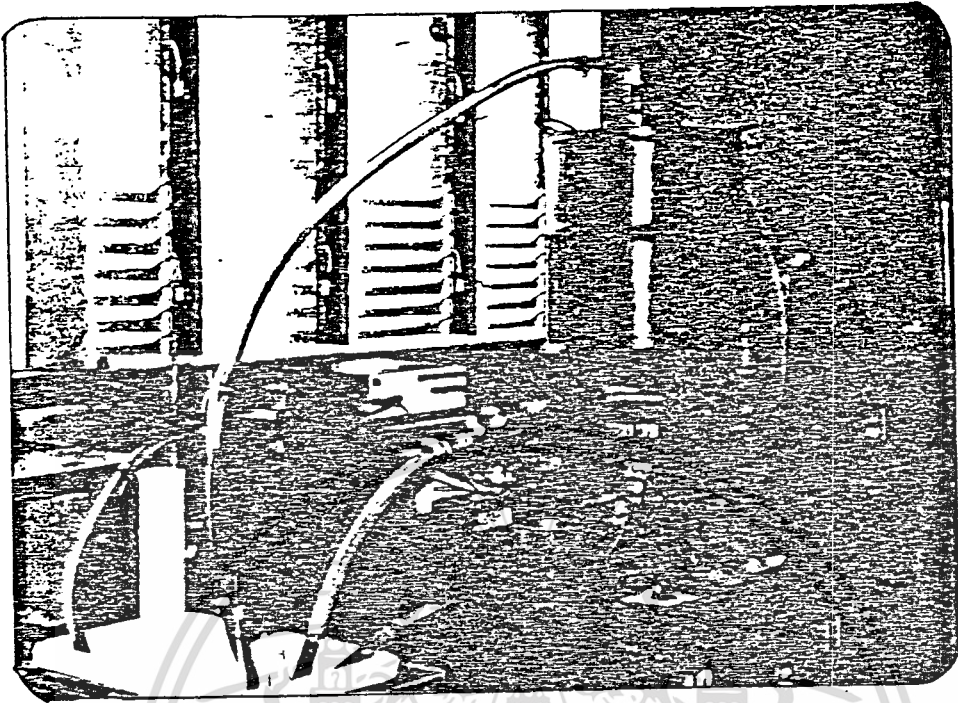
รูปที่ 4-3

จากรูปที่ 4-3 จะมีถังน้ำซึ่งมีค่า head ของน้ำในถังคงที่ โดยมีท่อส่งน้ำเข้าถังอยู่ตลอดเวลา น้ำที่มากเกินไปจะล้นออกทางท่อระบายน้ำล้น น้ำจากท่อจ่ายน้ำจะไหลผ่านเข้าสู่ชุดเครื่องมือวัด ทำการวัดความเร็วของน้ำ แล้วนำมาคำนวณหาอัตราการไหลแบบปริมาตรของน้ำที่ไหลผ่านท่อ เปรียบเทียบกับ อัตราการไหลแบบปริมาตรที่วัดได้จากกระบอกตวง

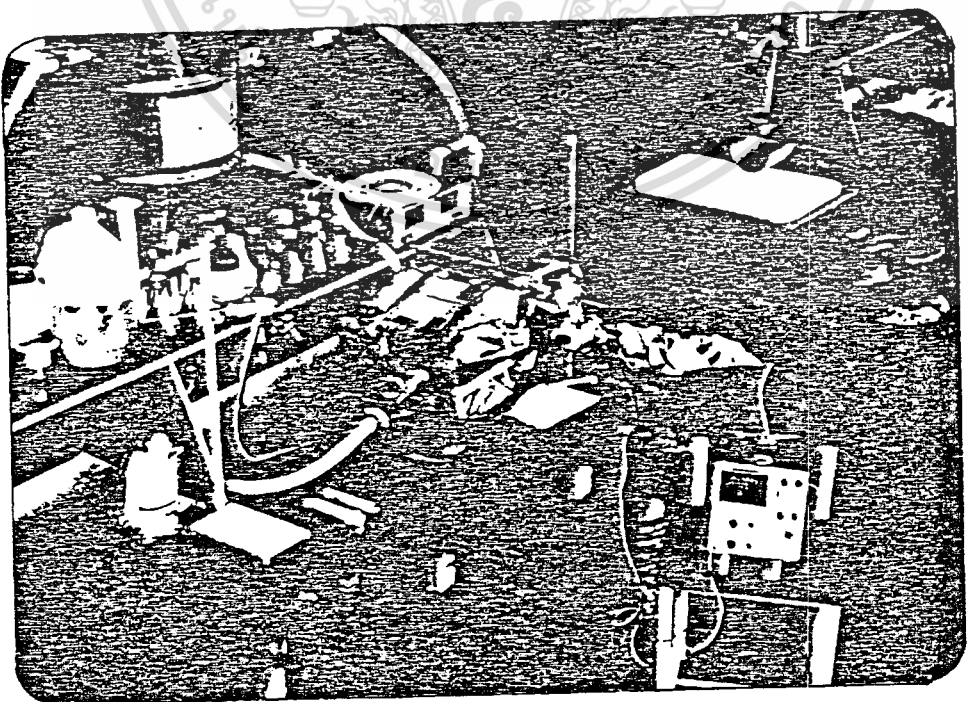
ได้ทำการทดลองโดยควบคุมอัตราการไหลให้อยู่ในช่วง thermosyphon flow ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. เปลี่ยนขนาดของหยดน้ำมันผสมให้เท่ากับ  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{4}$  และ 1 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ

2. วัดระยะเวลาที่หยดน้ำมันใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านระยะทาง 5, 10, 15 และ



รูปที่ 4-4 ถึงจ่ายน้ำที่มี head คงที่



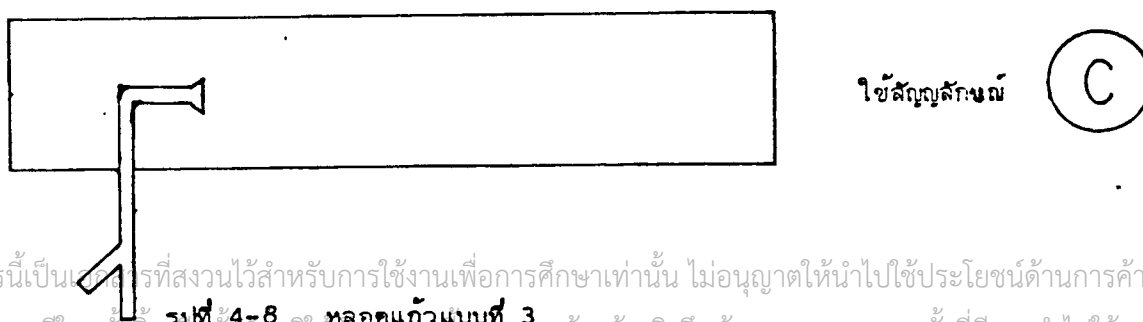
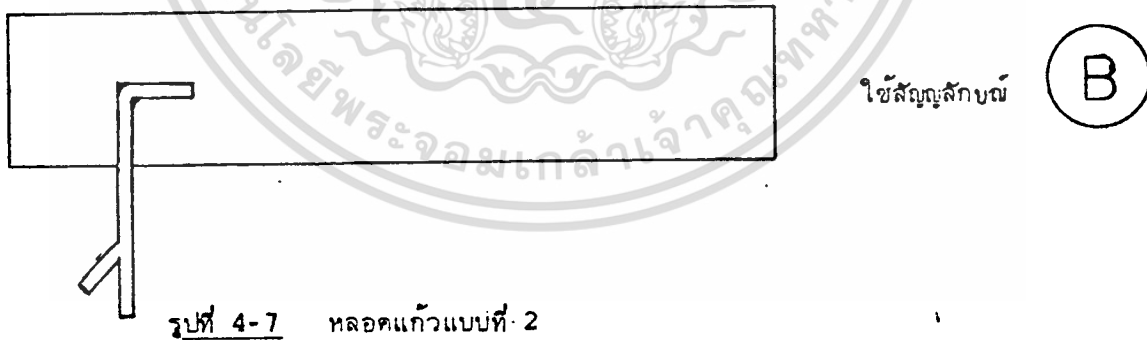
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกที่รูปที่ 4-5 ค่ะ แปลกๆ ทดสอบอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การฉีดหยดน้ำมันผสมเข้าไปในท่อได้ใช้หลอดแก้ว 3 แบบ ดังแสดงไว้ใน

รูปที่ 4-6 ถึง 4-8

ผลการทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 4-9 ถึง 4-19

สัญลักษณ์ที่ใช้ในการเขียนกราฟ



- I = น้ำมันผสมชนิดที่ 1
- II = น้ำมันผสมชนิดที่ 2
- III = น้ำมันผสมชนิดที่ 3
- IV = น้ำมันผสมชนิดที่ 4
- $\nabla$  = รัศมีระยะ 5 ซม.
- $\triangle$  = รัศมีระยะ 10 ซม.
- $\square$  = รัศมีระยะ 15 ซม.
- $\bigcirc$  = รัศมีระยะ 20 ซม.
- $\blacksquare$  = เฉลี่ยจากที่วัดได้ทุกระยะทาง
- $\odot$  = เฉลี่ยจากที่วัดได้ทุกระยะทาง เมื่อขนาดหยคน้ำมันผสม =  $\frac{1}{4}$  D  
และใช้หลอดแล้วแบบที่ 1
- $\odot$  = เฉลี่ยจากที่วัดได้ทุกระยะทาง เมื่อขนาดหยคน้ำมันผสม =  $\frac{1}{4}$  D  
และใช้หลอดแก้วแบบที่ 2
- $\odot$  = เฉลี่ยจากที่วัดได้ทุกระยะทาง เมื่อขนาดหยคน้ำมันผสม =  $\frac{1}{2}$  D
- $\odot$  = เฉลี่ยจากที่วัดได้ทุกระยะทาง เมื่อขนาดหยคน้ำมันผสม =  $\frac{3}{4}$  D
- $\bullet$  = เฉลี่ยจากที่วัดได้ทุกระยะทาง เมื่อขนาดหยคน้ำมันผสม = D

(A) (1/4) D

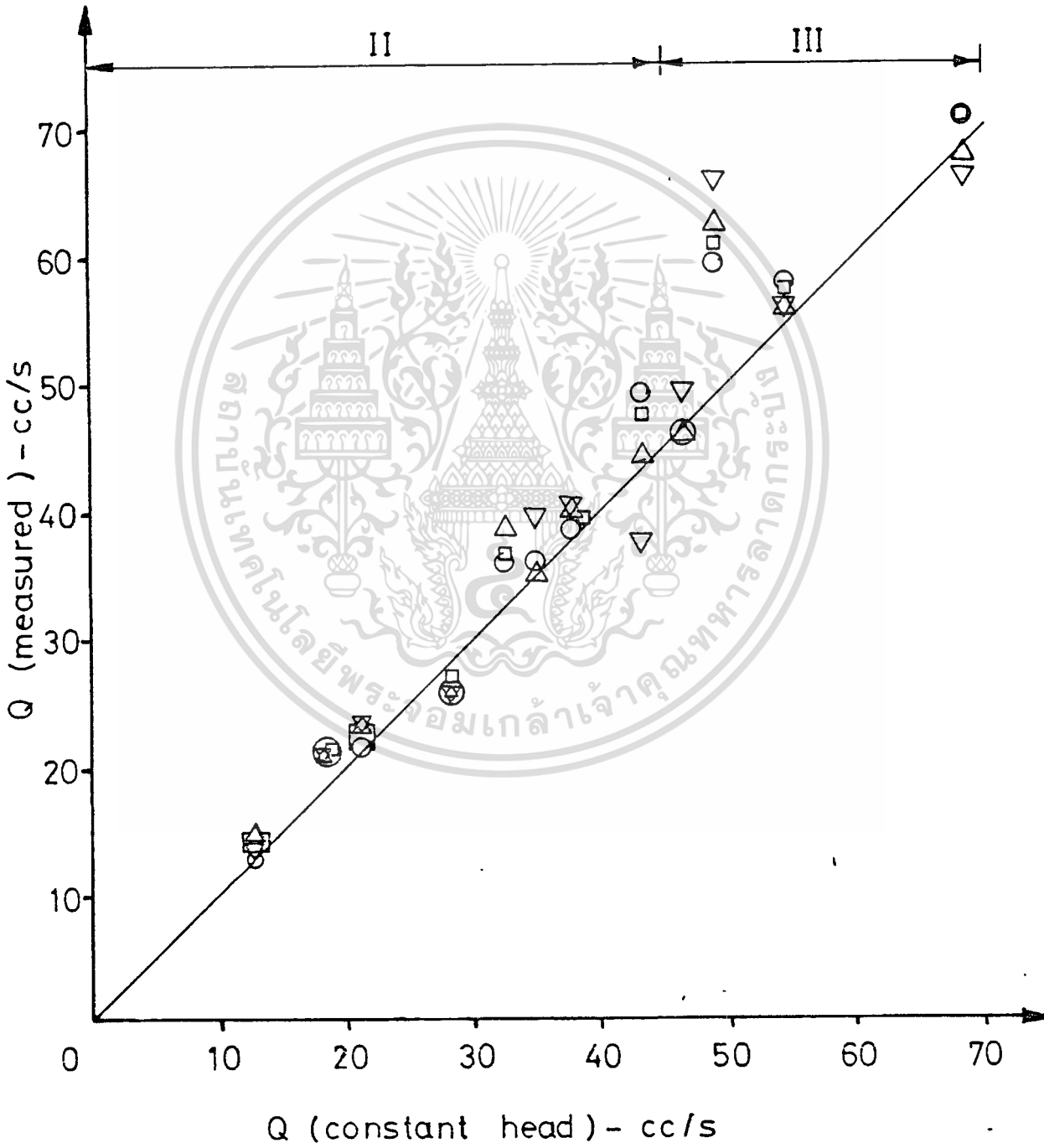


Fig. 4-9

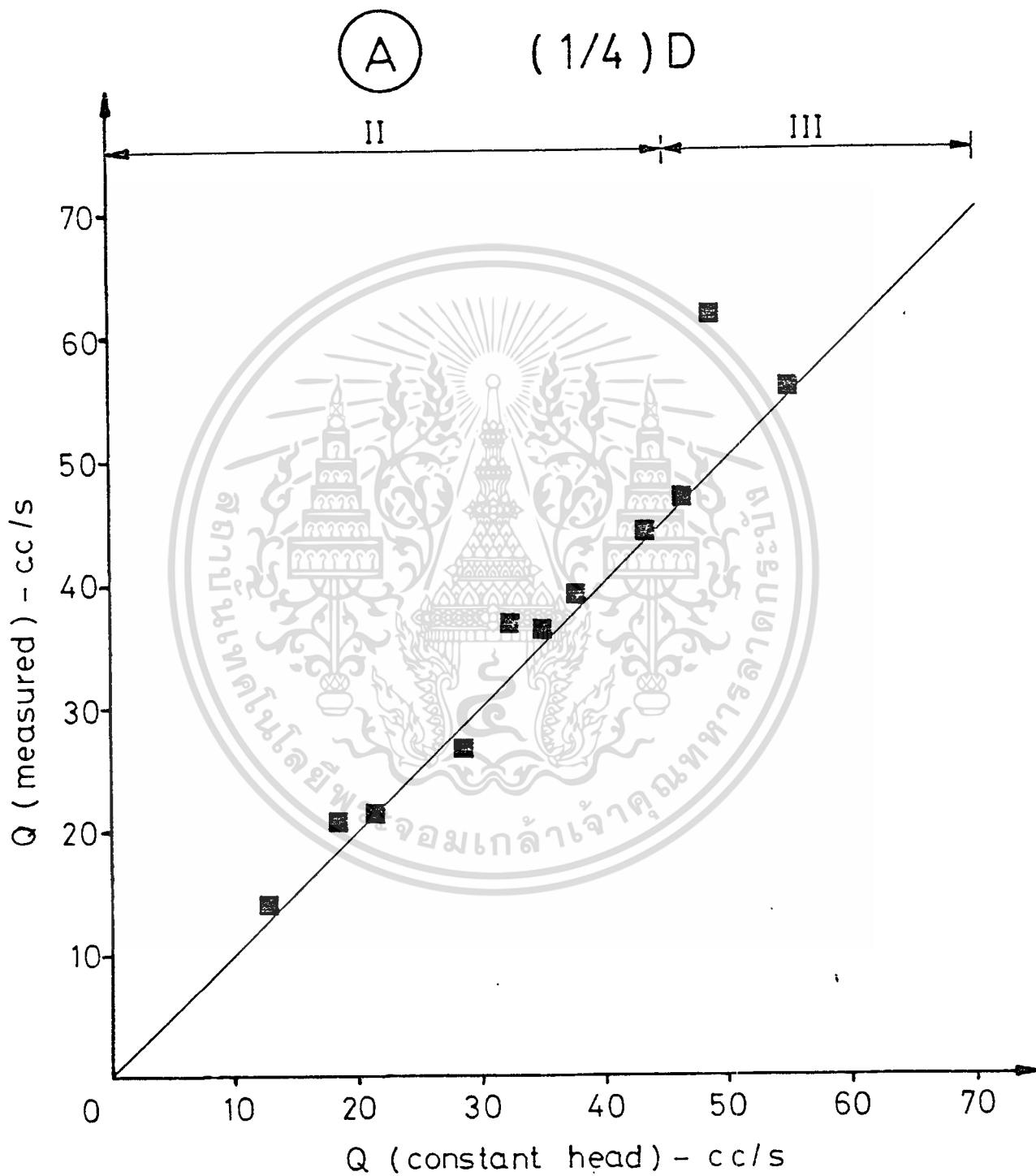


Fig. 4-10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

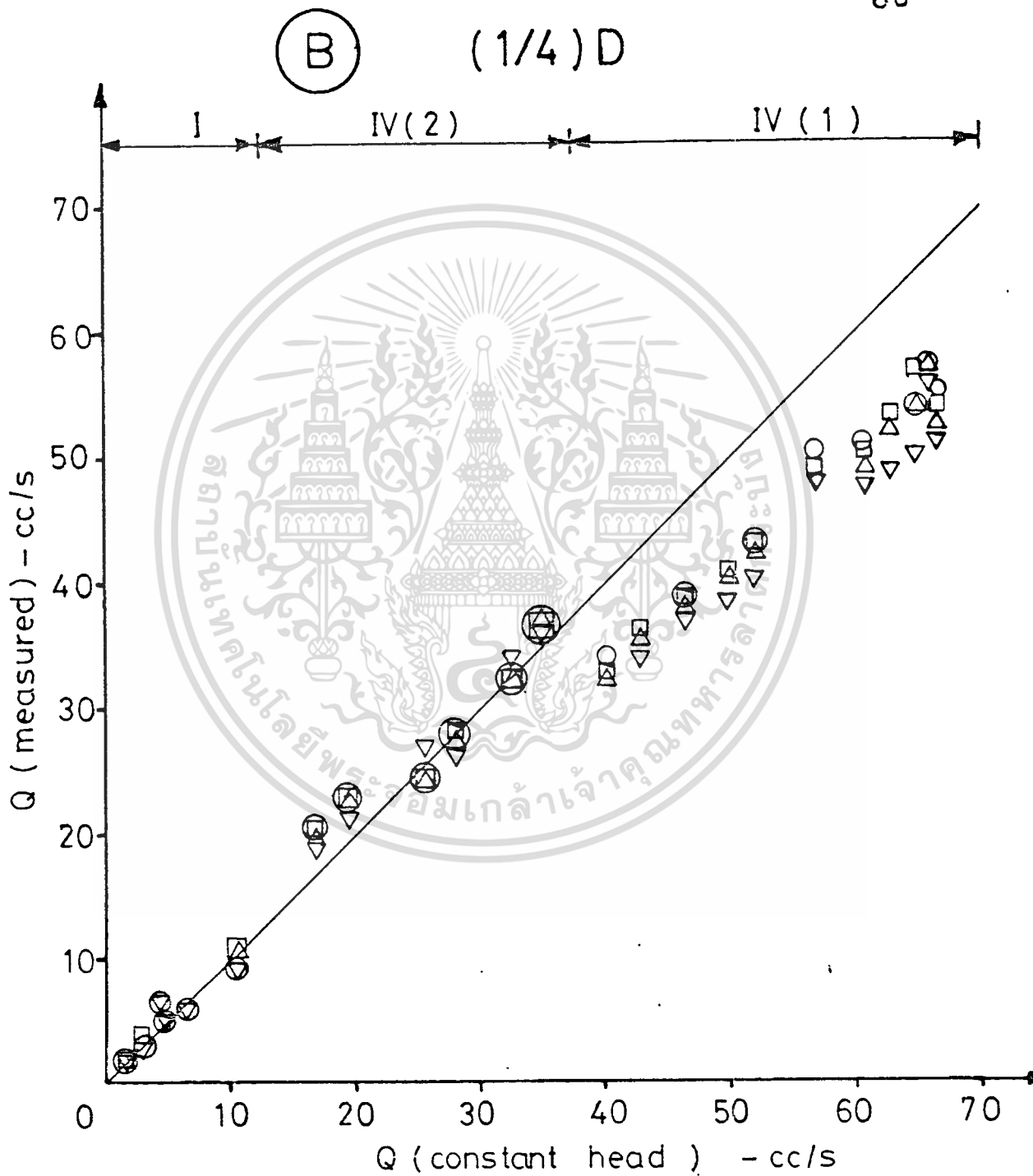


Fig 4-11

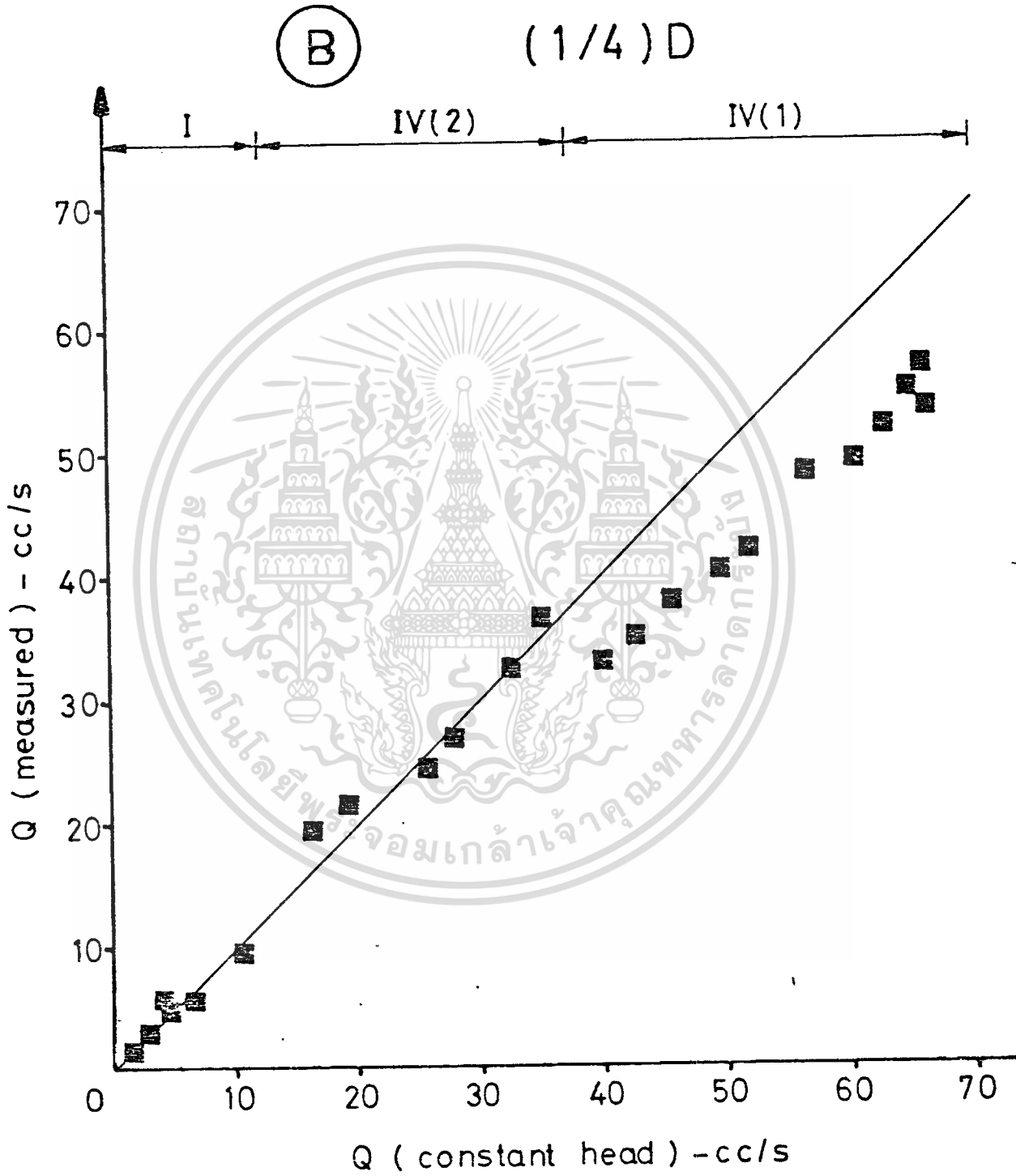


Fig. 4-12

(C)

(1/2)D

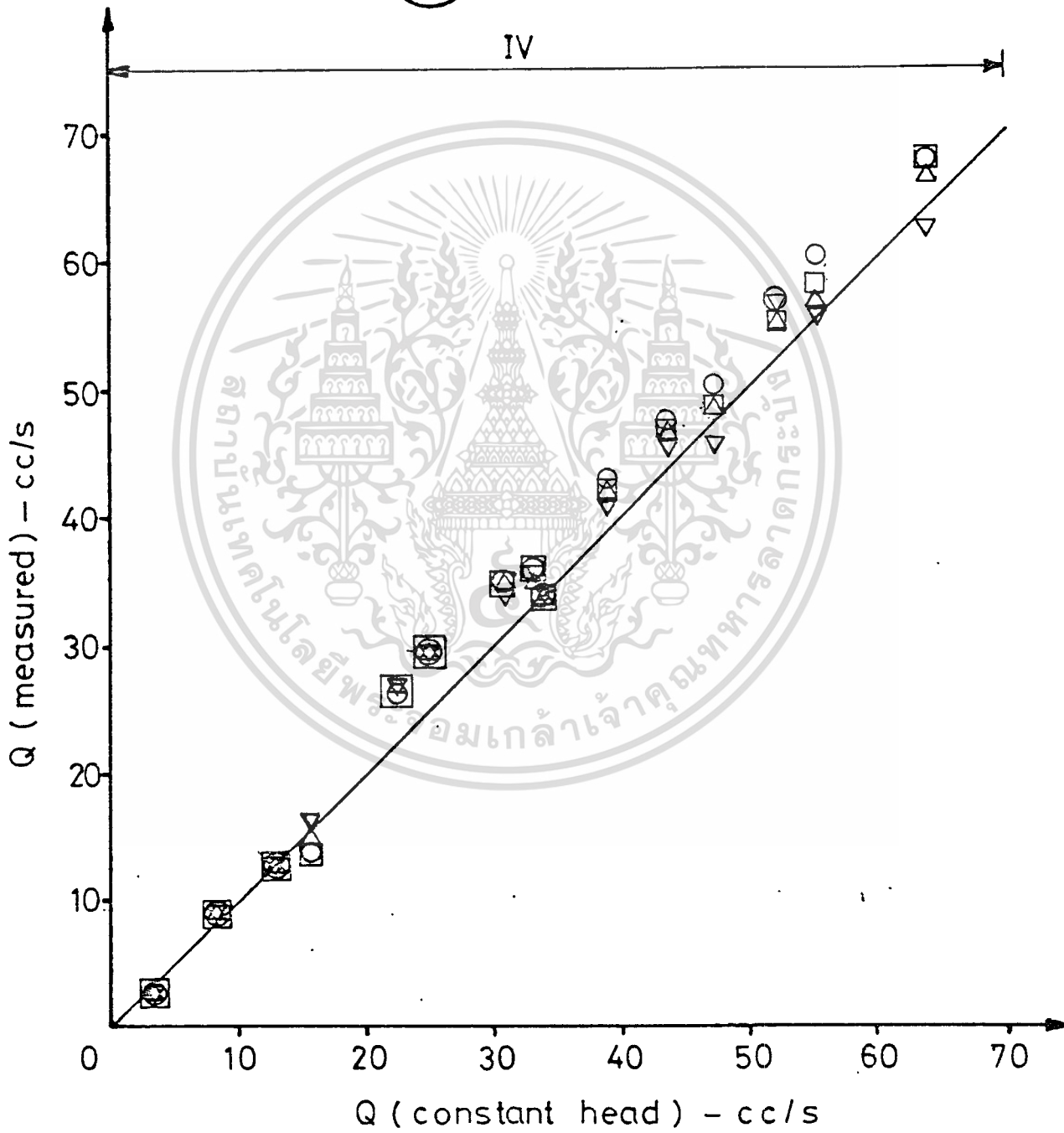


Fig. 4-13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

(C)

(1/2)D

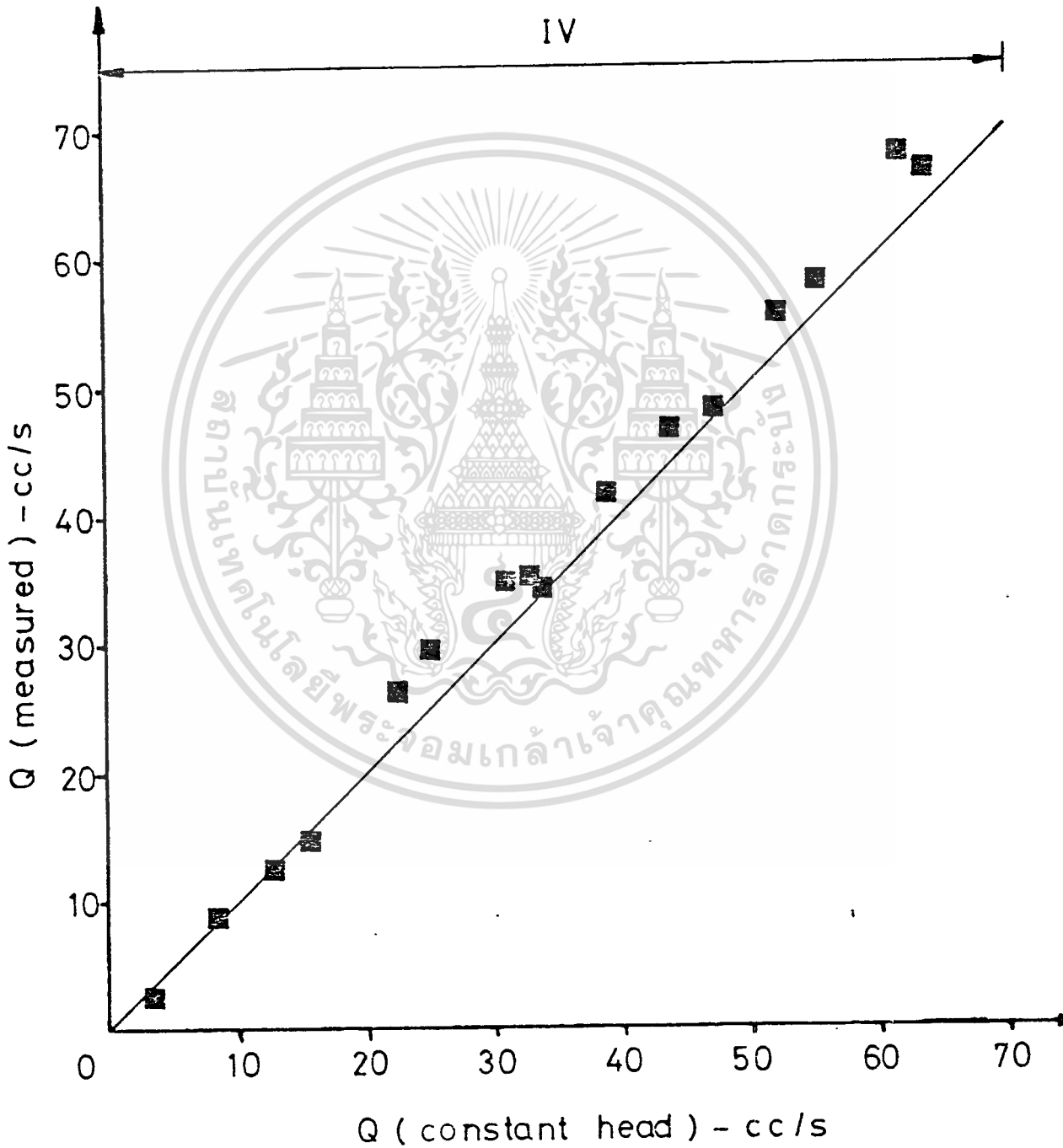


Fig. 4-14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

(C) (3/4)D

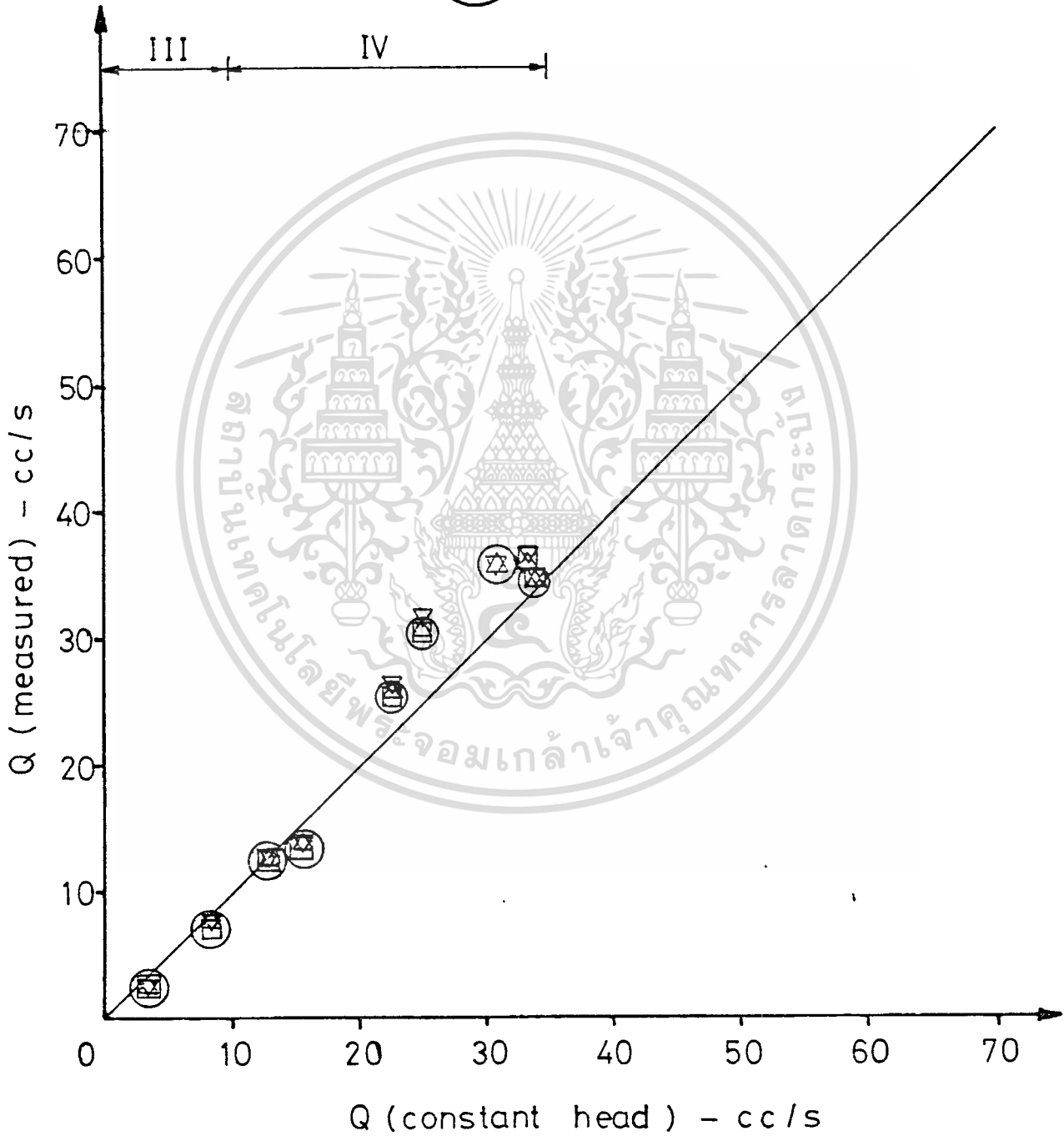


Fig. 4-15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

(C) (3/4) D

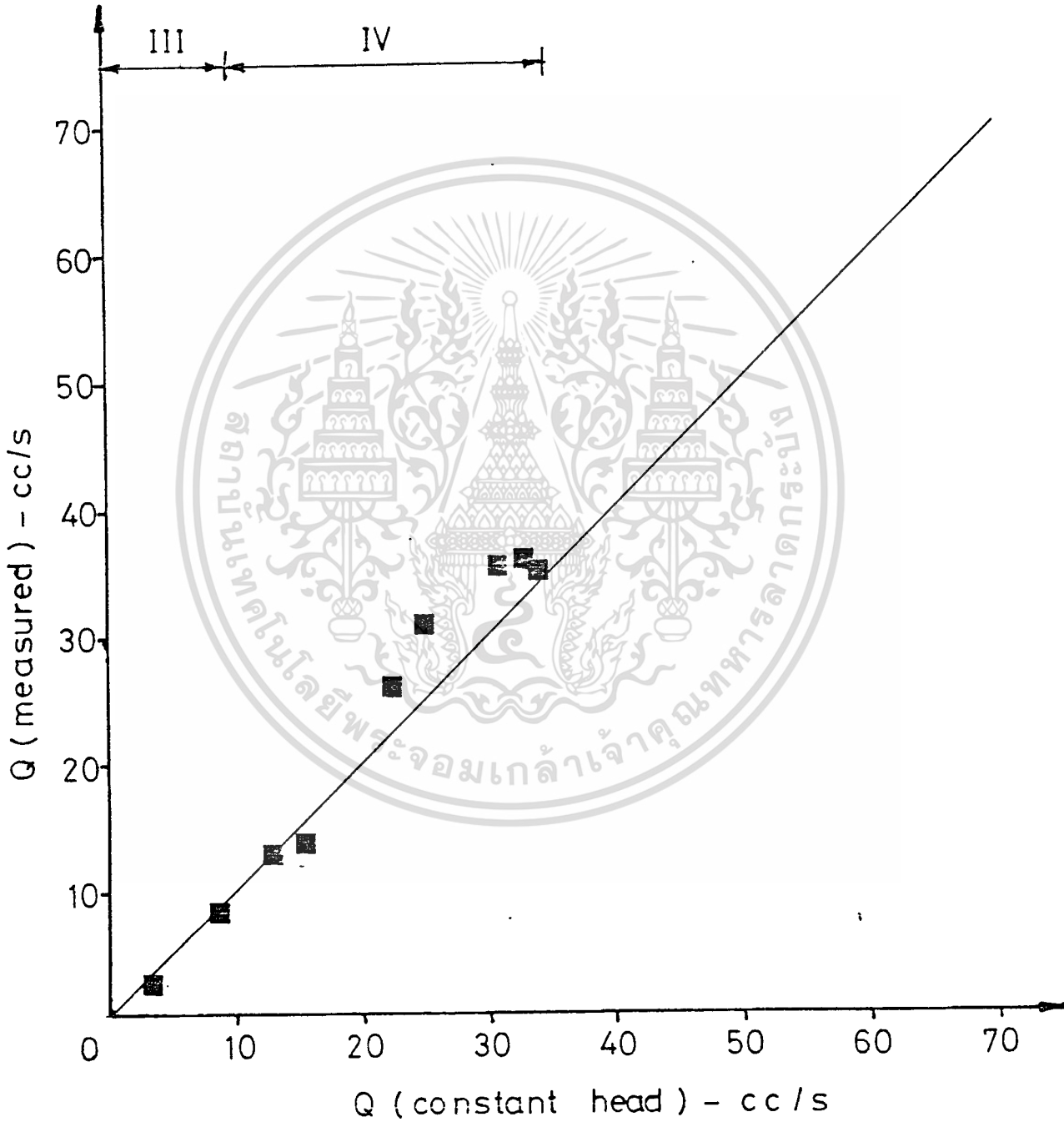


Fig. 4-16

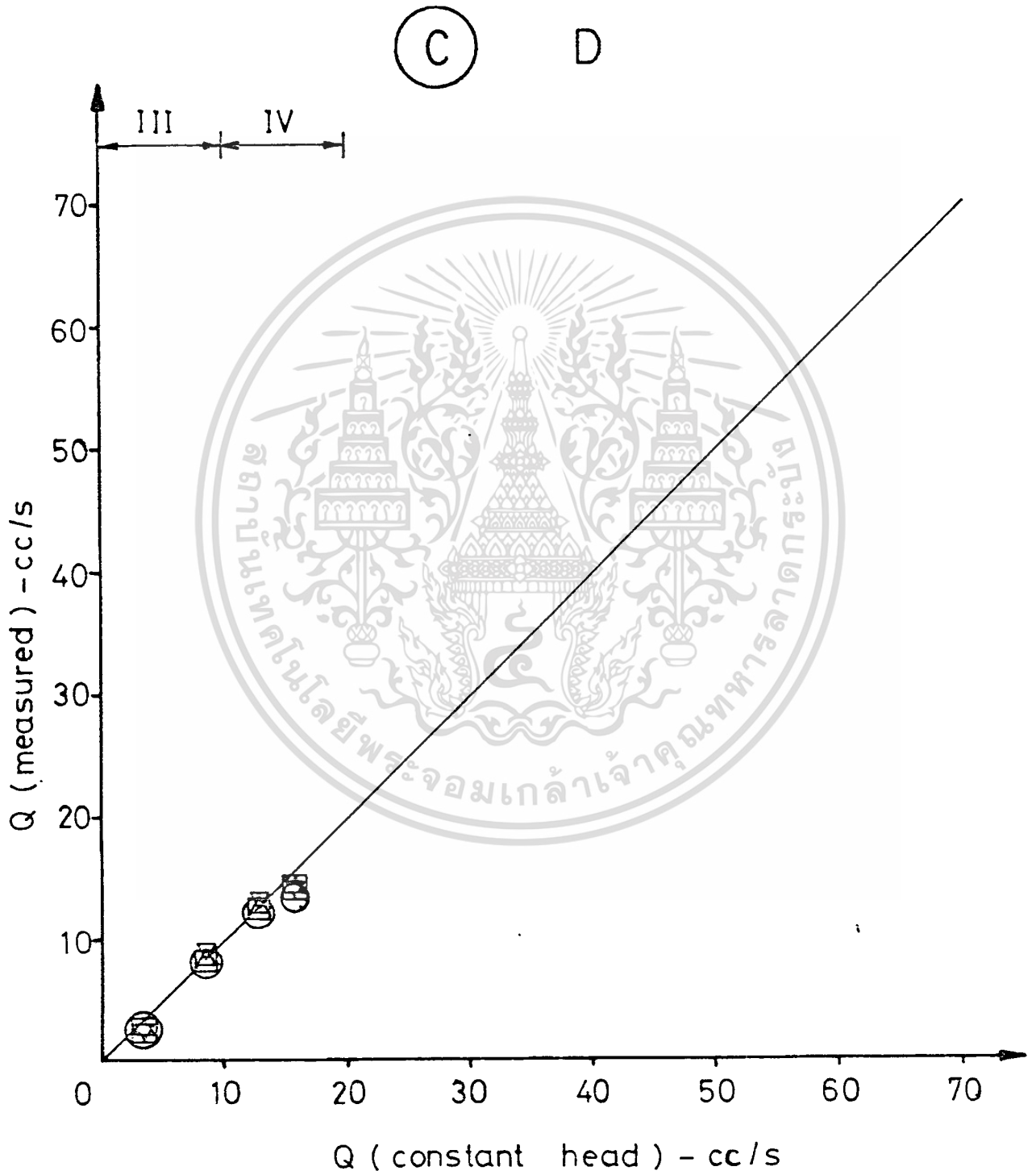


Fig. 4-17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

(C) D

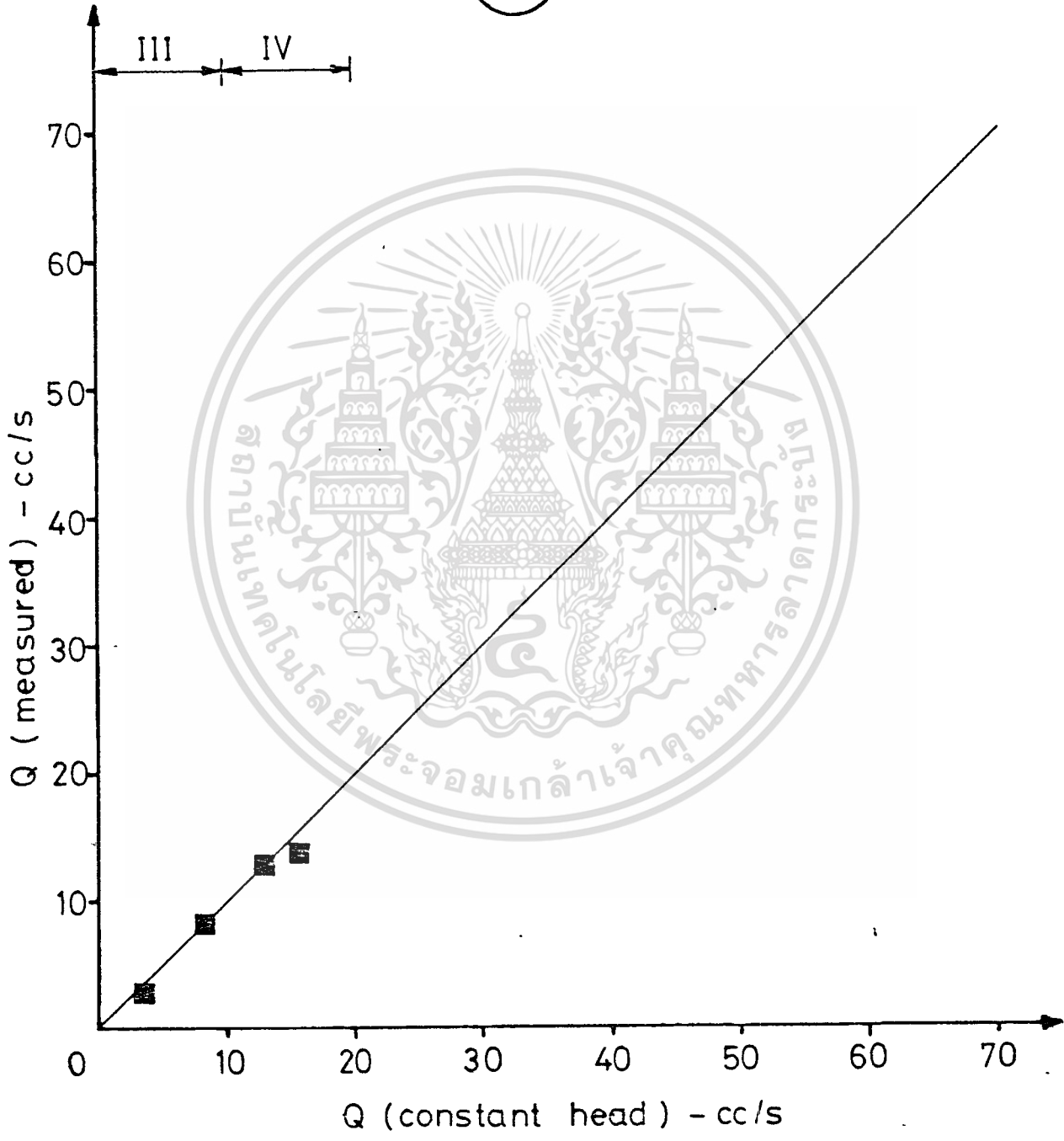


Fig. 4-18

(A) (B) (C) (1/4, 1/2, 3/4, 1) D

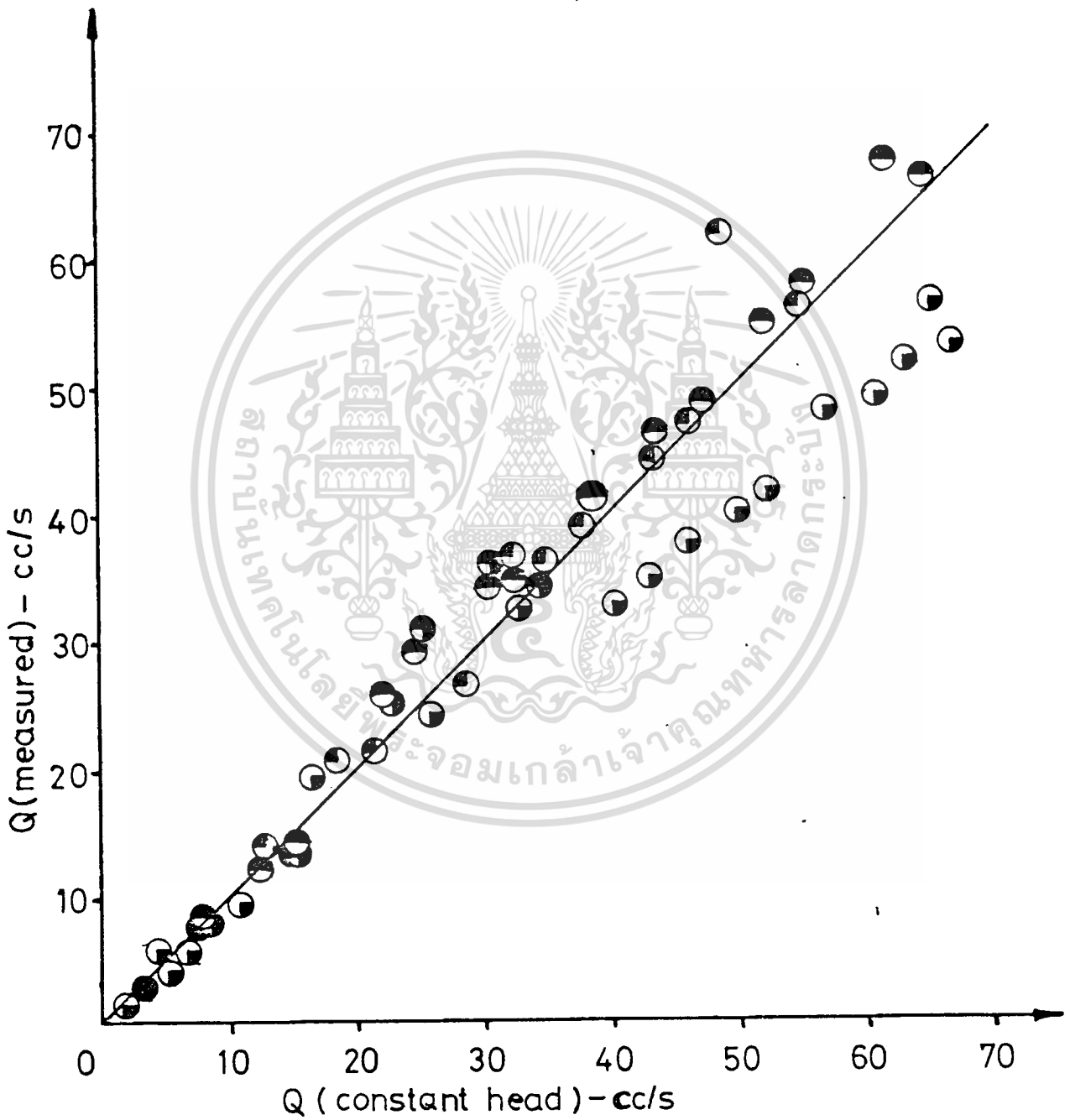


Fig. 4-19

จากผลการทดลองวัดอัตราการไหลของน้ำในท่อซึ่งควบคุมให้มีอัตราการไหลในช่วงเดียวกับการไหลแบบเทอร์โมไซฟอน (น้อยกว่า 40 cc/sec) จะเห็นได้ว่า

1. อัตราการไหลที่วัดได้มีค่าถูกต้องใกล้เคียงกับอัตราการไหลจริงซึ่งกำหนดโดยแหล่งจ่ายน้ำซึ่งมี head คงที่
2. ค่าอัตราการไหลซึ่งคำนวณได้จากการวัดเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านระยะ 5, 10, 15 และ 20 ซม. ให้ผลไม่ต่างกัน
3. ค่าอัตราการไหลที่วัดได้ไม่ขึ้นกับขนาดของหยดน้ำมัน ประเด็นนี้ต่างไปจากผลการวิเคราะห์ในบทที่ 2

ดังนั้นถ้าเรานำเครื่องมือนี้ไปวัดอัตราการไหลจริง ในระบบหน้าร้อนด้วยแสงอาทิตย์ที่มีการไหลแบบเทอร์โมไซฟอน ค่าที่วัดได้ควรถูกต้องพอสมควร

ความแตกต่างระหว่างอัตราการไหลจริง และอัตราการไหลที่วัดได้มีเด่นชัด 2 กรณี คือ

- ก. เมื่อมีความแตกต่างระหว่าง ถ.พ. ของหยดน้ำมันผสม และ ถ.พ. ของน้ำในท่อมากพอสมควร จะทำให้หยดน้ำมันลอยครูด หรือจมไกลไปกับผิวท่อ ในขณะที่เคลื่อนที่ไป ทำให้อัตราการไหลที่วัดได้ต่ำกว่าค่าที่ควรจะเป็น
- ข. เมื่อหยดน้ำมันมีขนาดเล็ก และเคลื่อนที่ไปตรงกลางท่อตลอดเวลา ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวมีความเร็วสูง ทำให้อัตราการไหลที่วัดได้สูงกว่าค่าที่ควรจะเป็น

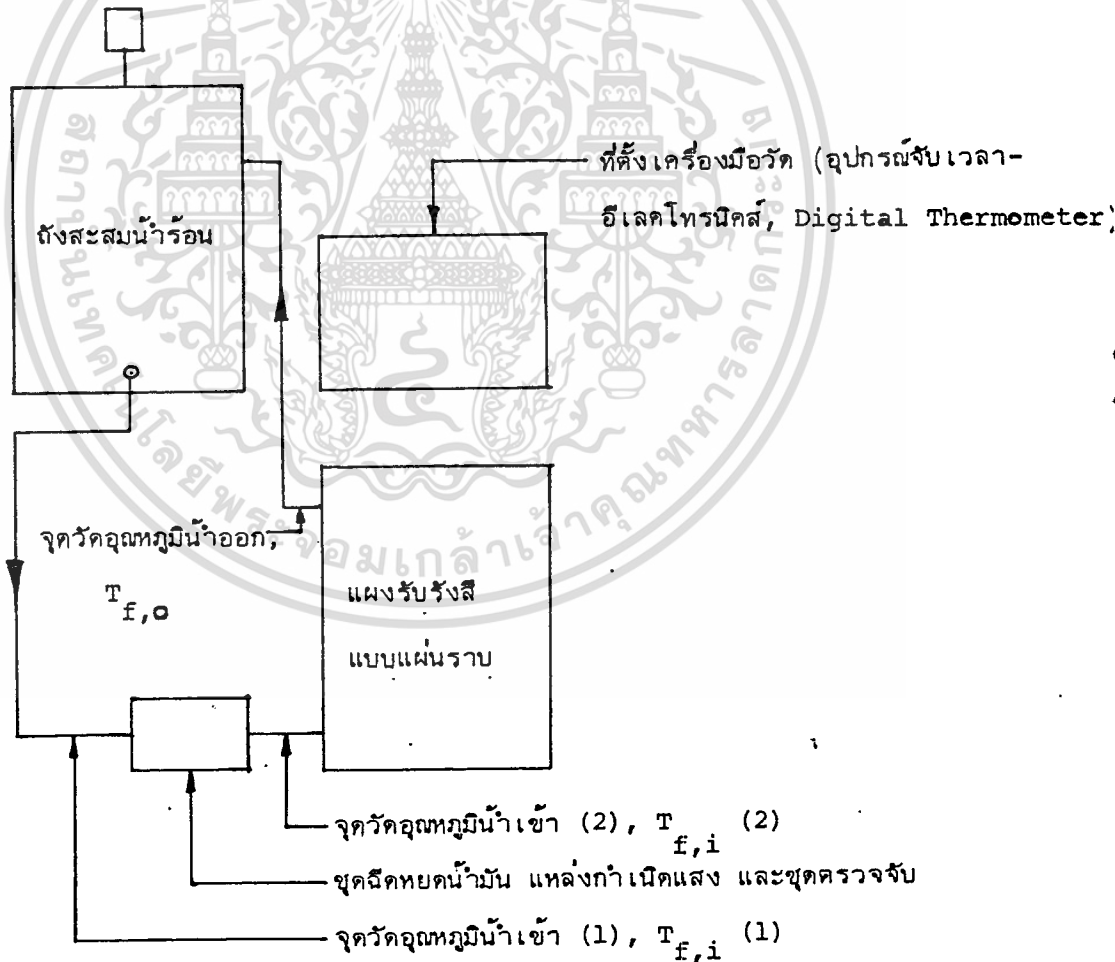
การที่อัตราการไหลที่วัดได้ไม่ขึ้นกับขนาดของหยดน้ำมันตามการวิเคราะห์ในบทที่ 2 ซึ่งมีสมมุติฐานว่าหยดน้ำมันเคลื่อนที่ไปในแนวกลางท่อเท่านั้น และมีสมมุติฐานเกี่ยวกับ velocity profile ของน้ำ สมมุติฐานทั้งสองมีลักษณะง่ายเกินไป ในการเคลื่อนที่จริง เราสังเกตเห็นว่าในกรณีที่หยดน้ำมันมีขนาดเล็กในขณะที่เคลื่อนที่จะมีการส่ายไปมาแทนที่จะเคลื่อนที่ไปในแนวกลางท่อตามสมมุติฐาน ดังนั้นหยดน้ำมันจะผ่านความเร็วต่างกันที่จุดต่าง ๆ ตามพื้นที่หน้าตัดของท่อ ความเร็วที่วัดได้จึงควรใกล้เคียงกับความเร็วเฉลี่ยตลอดพื้นที่หน้าตัดของท่อ มิใช่ความเร็วเฉลี่ยเฉพาะบนพื้นที่หน้าตัดของหยดน้ำมัน ซึ่งจะมีความสูงกว่าความเร็วเฉลี่ยของน้ำ-ตามสมมุติฐานในบทที่ 2

ส่วนในการตีที่หยดน้ำมันผสมมีขนาดใหญ่เต็มท่อ ไม่มีการส่ายไปมาในขณะเคลื่อนที่ อัตราการไหลที่วัดได้ ควรอธิบายได้ตามสมมุติฐานในบทที่ 2

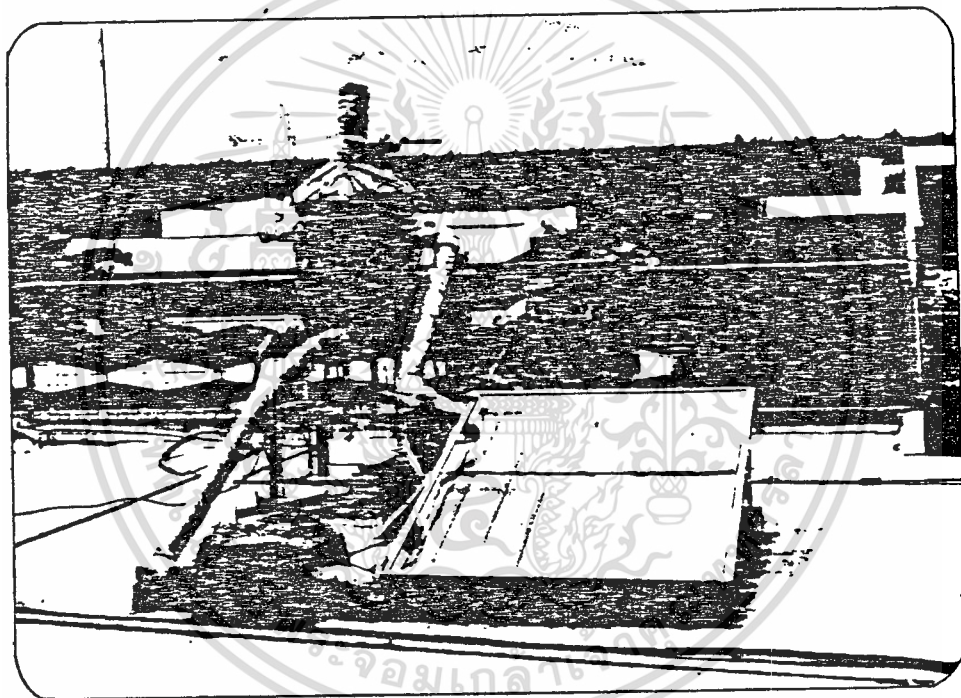
4.3 การวัดอัตราการไหลแบบเทอร์โมไฮฟอนในระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์

ได้ทำการวัดอุณหภูมิน้ำเข้า น้ำออกจากชุดเครื่องมือวัดความเร็วของน้ำ อุณหภูมิน้ำเข้า น้ำออกจากแผงรับรังสี อุณหภูมิแวดล้อม และความเร็วของน้ำ ตั้งแต่เวลา 6.00 น. จนถึง 18.00 น. ทำการวัดทุก ๆ ครึ่งชั่วโมง

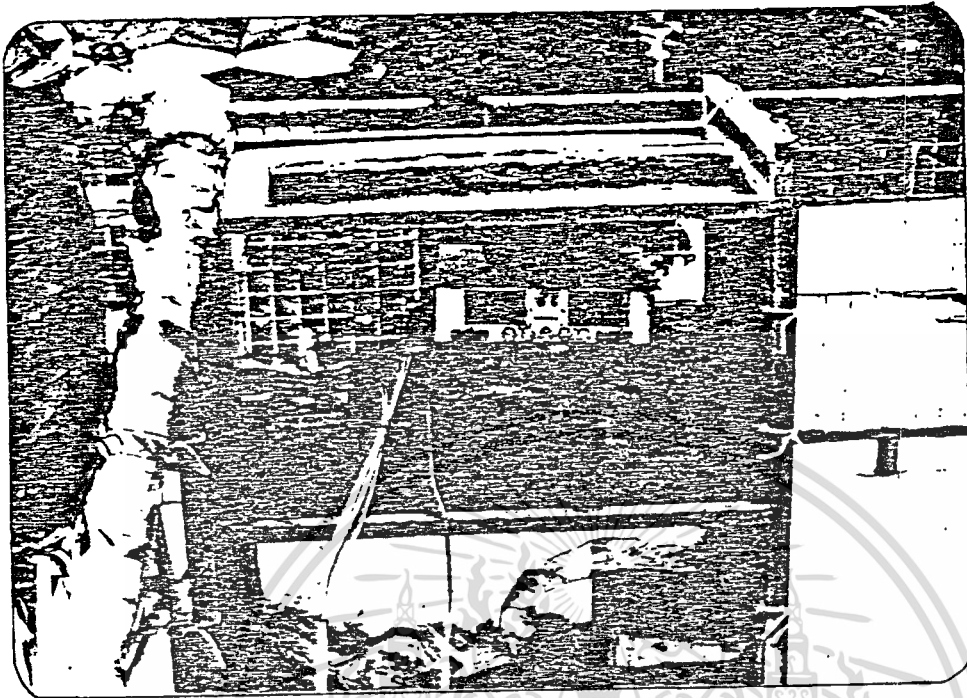
ติดตั้งเครื่องมือดังรูปที่ 4-20 ถึง 4-24



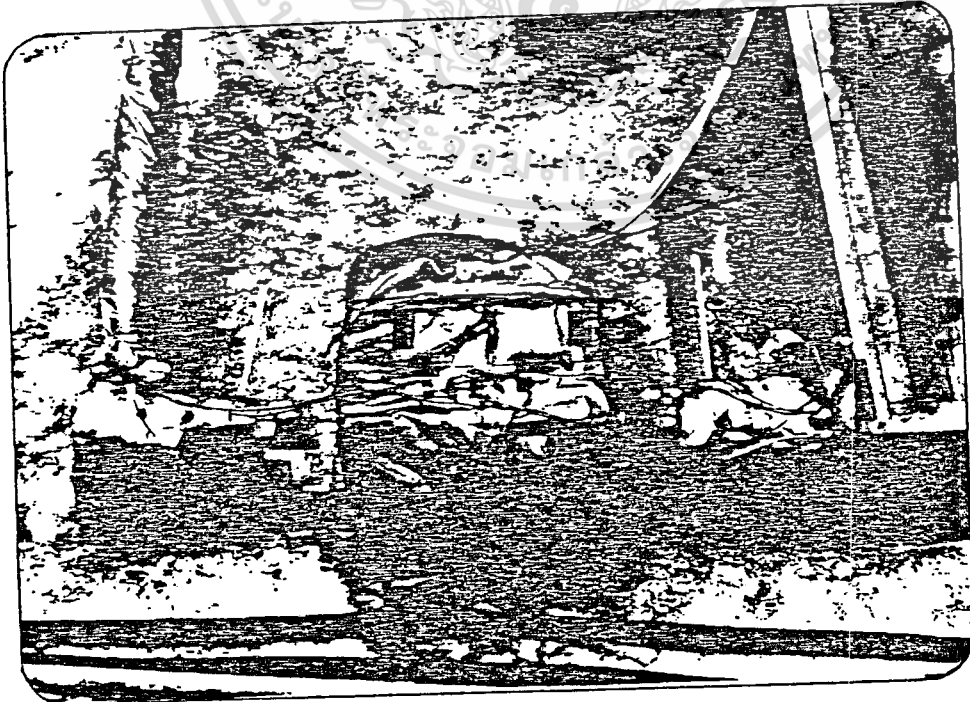
รูปที่ 4-20



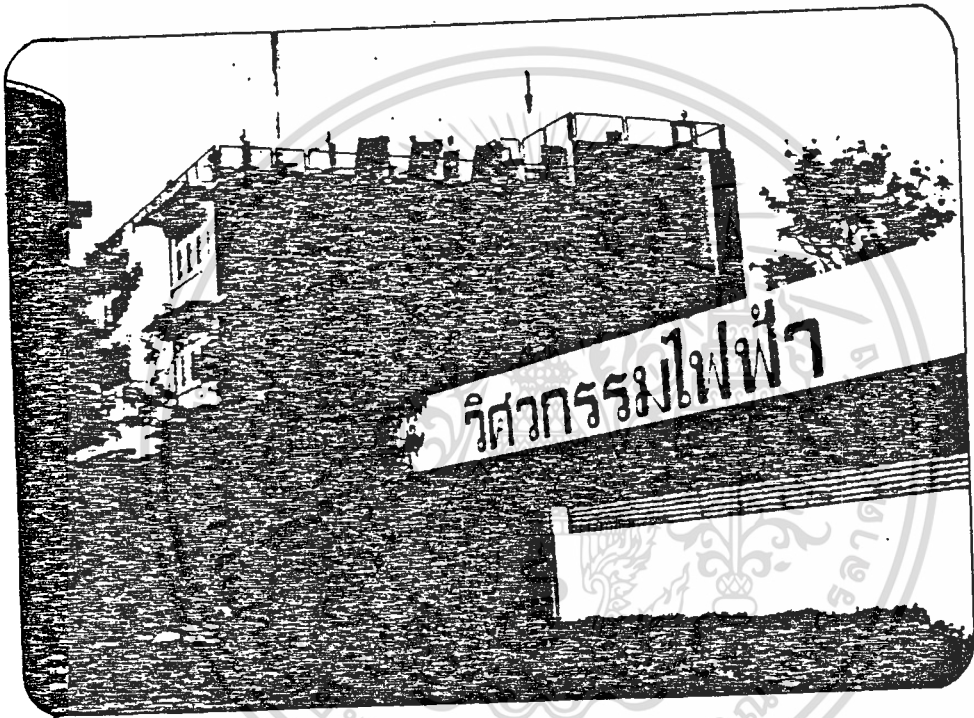
รูปที่ 4-21 ระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์



รูปที่ 4-22 ที่ตั้งเครื่องมือวัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



รูปที่ 4-24 ที่ตั้งระบบทำน้ำร้อนควยแสงอาทิตย์

รูปที่ 15 พฤษภากม พ.ศ. 2524

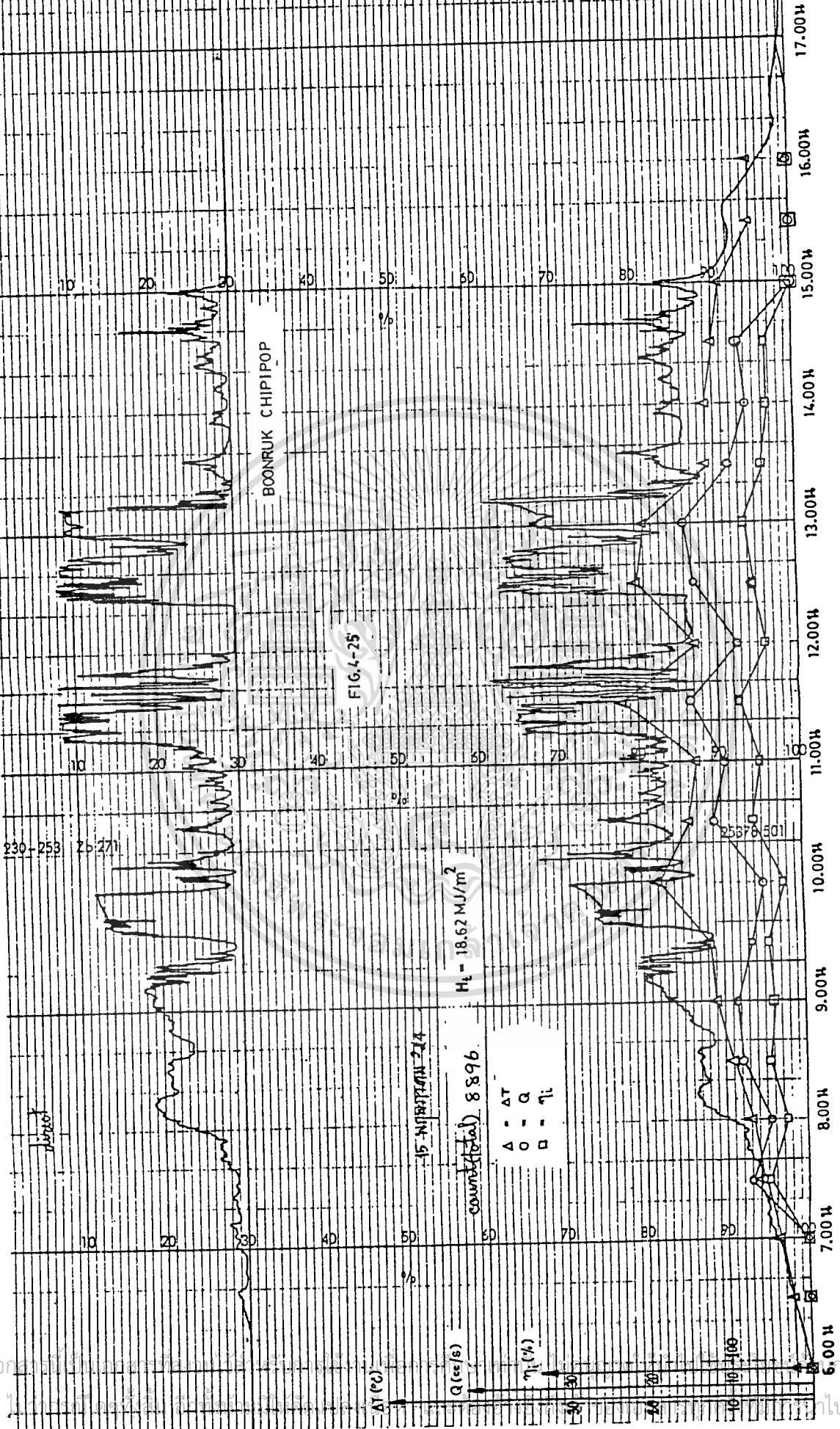
เวลา น.	H <sub>t</sub> w/m <sup>2</sup>	T <sub>a</sub> °C	T <sub>f,o</sub> °C	T <sub>f,i</sub> (2) °C	T <sub>f,i</sub> (1) °C	T <sub>i</sub> (av.) °C	ρ g/cm <sup>3</sup>	C <sub>p</sub> cal/g.°C	ΔT °C	V cm/s	Q cc/s	ḡ g/s	mC <sub>p</sub> ΔT W	H <sub>tC</sub> W	η <sub>i</sub> %
6.00	8.22	28	29	27	27	27	0.99	1.0	2	0	0	0	0	13.55	0
6.30	32.86	28	29	27	27	27	0.99	1.0	2	0	0	0	0	54.22	0
7.00	131.44	28	31	27	27	27	0.99	1.0	4	0	0	0	0	216.88	0
7.30	197.16	31	37	31	31	31	0.99	1.0	6	1.57	6.81	6.81	171.08	325.31	52.59
8.00	328.6	33	40	33	32	32.5	0.99	1.0	7	1.06	4.6	4.6	134.82	542.19	24.87
8.30	427.18	33	41	32	29	30.5	0.99	1.0	9	1.86	8.07	8.07	304.1	704.85	43.14
9.00	542.19	35	44	33	32	32.5	0.99	1.0	11	1.86	8.07	8.07	371.68	894.61	41.55
9.30	427.18	34	47	35	33	34	0.99	1.0	12	1.46	6.33	6.33	318.04	704.85	45.12
10.00	952.94	35	53	35	31	33	0.99	1.0	18	1.21	5.25	5.25	395.67	1572.35	25.16
10.30	657.2	36	54	40	40	40	0.99	1.0	14	2.55	11.06	11.06	648.32	1084.38	59.79
11.00	624.34	33	54	41	41	41	0.99	1.0	13	2.23	9.67	9.67	526.35	1030.16	51.09
11.30	903.65	35	60	38	39	38.5	0.99	1.0	22	2.84	12.32	12.32	1134.84	1491.02	76.11
12.00	591.48	36	60	47	48	47.5	0.99	1.0	13	1.72	7.46	7.46	406.06	975.94	41.61
12.30	1215.82	34	65	45	46	45.5	0.99	1.0	20	2.95	12.8	12.8	1071.87	1006.1	53.43
13.00	1051.52	35	68	49	52	50.5	0.99	1.0	19	3.25	14.1	14.1	1121.7	1735.0	64.65
13.30	542.19	35	66	55	57	56	0.98	1.0	11	1.85	8.02	8.02	369.38	894.61	41.29
14.00	492.9	34	67	56	58	57	0.98	1.0	11	1.39	6.03	6.03	277.72	813.285	34.15
14.30	492.9	34	69	59	60	59.5	0.98	1.0	10	1.47	6.38	6.38	267.13	813.285	32.85
15.00	607.91	33	68	59	61	60	0.98	1.0	9	0	0	0	0	1003.05	0
15.30	262.88	34	63	58	58	58	0.98	1.0	5	0	0	0	0	433.752	0
16.00	115.01	32	60	55	53	54	0.98	1.0	5	0	0	0	0	189.77	0

TABLE 1

หมายเหตุ:-  
 A = 4.337 cm<sup>2</sup>  
 A<sub>C</sub> = 1.65 m<sup>2</sup>  
 $T_i(av.) = \frac{T_{f,i}(1) + T_{f,i}(2)}{2}$

$\Delta T = T_{f,o} - T_{f,i}(2)$

1 cal/s = 4.187 W



BOONRUK CHIPIPOP

FIG. 4-75

230-253 Z6-271

$H_t = 18.62 \text{ MJ/m}^2$

15 นาทีแรก 2/4

count (total) 8896

- Δ - ΔT
- O - Q
- - η

การคำนวณ

จากค่าต่าง ๆ ที่วัดได้ ได้นำมาคำนวณหาประสิทธิภาพชั่วขณะของแผงรับรังสีแบบ-  
แผ่นราบ ซึ่งนับว่าเป็นครั้งแรกที่สามารถหาประสิทธิภาพชั่วขณะของแผงรับรังสีแบบแผ่นราบที่มีน้ำไหลผ่าน  
แบบเทอร์โมไซฟ่อนได้ในประเทศไทย ผลการวัดและการคำนวณแสดงไว้ดังตารางที่ 1 และรูปที่ 4-25

จากผลการทดลองที่ได้ จะเห็นได้ว่า

(1) ค่าอุณหภูมิแตกต่างระหว่างน้ำเข้าและน้ำออกจากแผงรับรังสี ( $\Delta T$ ) ค่า-  
อัตราการไหลของน้ำ ( $Q$  หรือ  $\dot{m}$ ) และค่าประสิทธิภาพชั่วขณะของแผงรับรังสี ( $\eta_c$ ) จะ  
เปลี่ยนแปลงตามรังสีรวมของดวงอาทิตย์

(2) ค่าอัตราการไหลอยู่ในช่วงเทอร์โมไซฟ่อน ซึ่งมีจุดที่วัดผิดพลาดที่เวลา  
10.00 น. ซึ่งควรจะวัดได้มากกว่านี้ แต่เนื่องจากการเปลี่ยนของรังสีรวมอย่างรวดเร็ว  
เนื่องจากเมฆบัง และทำการวัดล่าช้า

(3) ประสิทธิภาพชั่วขณะที่วัดได้จากแผงรับรังสีตัวที่ใช้ทดลองจะเห็นว่า  
ได้ค่าซึ่งสมเหตุสมผล คือในช่วงเช้า และเย็น ค่าประสิทธิภาพชั่วขณะจะต่ำเนื่องจากแผงรับ-  
รังสีรับแสงได้ไม่เต็มที่ แต่ในช่วงเวลากลางวัน ค่าประสิทธิภาพชั่วขณะจะสูงเนื่องจาก  
แสงอาทิตย์ส่องลงบนแผงรับรังสีอย่างเต็มที่หรือเกือบ ๆ จะเต็มที่ ค่า transmittance  
เมื่อดวงอาทิตย์ทำมุมกับแผงรับรังสีได้จาก Anderson [51] ประสิทธิภาพชั่วขณะของ  
แผงรับรังสีตัวนี้มีค่าต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากเกิดความร้อนสูญเสียจากระบบมาก เนื่องจากใช้  
กระจกชั้นเดียวและใช้สีดำด้านทาแผ่นดูดแสง ถ้าต้องการให้ประสิทธิภาพชั่วขณะมีค่าสูง  
ต้องใช้กระจกสองชั้น และใช้ผิวเลือกรังสีที่มีคุณสมบัติเหมาะสม [52]

(4) ในช่วงเวลา 6.00 น. - 7.00 น. จะไม่มีการไหลของน้ำ ถึงแม้  
จะมีแสงอาทิตย์แล้วก็ตาม ทั้งนี้เพราะ แสงอาทิตย์ตกกระทบเป็นมุมเอียงมากกับแผงรับรังสี  
ทำให้พลังงานความร้อนที่ได้รับไม่มากพอ

(5) ในช่วงเวลา 7.00 น. - 8.00 น. จะสังเกตเห็นว่ามีลักษณะของ transient เมื่อน้ำเริ่มไหล

(6) ในช่วงเย็น ที่เวลา 15.00 น. จะไม่มีการไหลของน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพชั่วขณะเป็นศูนย์ หลังจากเวลานั้น สังเกตได้ว่าเกิดการไหลอย่างเทอร์โมไซฟอนแบบย้อนกลับ ซึ่งไม่ได้ทำการวัด

(7) ตั้งแต่เวลาประมาณ 18.00 น. เป็นต้นไปจะไม่มีแสงอาทิตย์ น้ำในระบบจะเป็นตัวตามกฎการเย็นตัวของนิวตัน

#### หมายเหตุ :-

ในการวัดอุณหภูมิเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล แทนเทอร์มิเตอร์ เพราะว่าให้ผลการวัดที่เที่ยงตรงกว่า โดยได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การที่ใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลแบบ K ก็เพราะว่ามีผลตอบสนองเป็นแบบเชิงเส้น และใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิที่ครอบคลุมช่วงอุณหภูมิที่ต้องการวัดในระบบ ( $0 - 100^{\circ}\text{C}$ )

การที่จุ่มเทอร์โมคัปเปิ้ลลงไปวัดอุณหภูมิของน้ำตรงกลางท่อ แล้วคิดว่าเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ ณ พื้นที่หน้าตัดนั้น จริง ๆ แล้วจะไม่ถูกต้องนัก แต่ในทางวิศวกรรมไม่จำเป็นต้องวัดละเอียดมากนัก เพราะเมื่อนำไปคำนวณจะมีความไม่ถูกต้องของการวัดค่าอื่น ๆ อีกหลายค่า ซึ่งมีความผิดพลาดมากกว่าความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดอุณหภูมิแบบนี้ แต่ถ้าจะวัดให้ถูกต้องจริงๆ ต้องใช้ thermopile

สำหรับวิธีการวัดประสิทธิภาพตามมาตรฐานแบบต่าง ๆ ดูได้จาก [50], Cooper et. al. [53] และ Gordon [54]

### บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

- (ก) จากผลการทดลองที่ได้แสดงว่าสามารถใช้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้น วัดอัตราการไหลแบบ-เทอร์โมไซฟอนในระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ได้ โดยให้ผลการวัด เที่ยงตรงพอสมควร และใช้อุปกรณ์ราคาถูก ความถูกต้องในการวัดจะสูงกว่าวิธีการวัดของ Ong [4] มาก ความผิดพลาดในการวัดไม่เกิน 5% (โดยประมาณ)

อย่างไรก็ตาม วิธีการวัดที่ใช้ในปัจจุบันยังมีขีดจำกัด คือ

- (1) สามารถวัดอัตราการไหลได้อย่างกึ่งต่อเนื่อง และกึ่งอัตโนมัติ
- (2) วัดได้เฉพาะค่าอัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำในท่อ ไม่สามารถใช้วัด velocity profile ของน้ำในท่อ
- (3) วัดความเร็วของน้ำได้ตั้งแต่ 1 cm/sec (โดยประมาณ) ขึ้นไป [ถ้าใช้ท่อแก้วที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน  $\approx$  2.25 ซม. ก็จะสามารถวัดได้ตั้งแต่ 4 cc/sec (โดยประมาณ) ขึ้นไป] ต่ำกว่านี้วัดได้ยาก

การวัดด้วย Laser Doppler Anemometer ตามรายงานของ Ho [8]

จะขจัดขีดจำกัดในข้อ (1), (2) และ (3) ได้ แต่ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีราคาสูงกว่าหลายสิบเท่าตัว การวัดได้ละเอียดเช่นนี้จะไม่มีความจำเป็นในการวัดอัตราการไหลของน้ำ เพื่อนำไปหาประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ที่มีการไหลของน้ำในระบบ เป็นแบบเทอร์โมไซฟอน

- (ข) การใช้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นยังมีปัญหาในทางปฏิบัติบางประการ คือ

- (1) การทำน้ำมันผสมที่มี ถ.พ. ใกล้เคียงกับน้ำในระบบ ซึ่ง ถ.พ. ของน้ำและน้ำมันผสม จะต้องเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิเท่า ๆ กัน
- (2) การควบคุมวิธีการฉีดหยคน้ำมันให้ได้ขนาดตามต้องการ ประเด็นนี้อาจปรับปรุงได้ โดยการใช้กระบอกฉีดซึ่งควบคุมปริมาณของน้ำมันที่ฉีดออกได้อย่างแน่นอน และใช้ลูกยางบีบลมที่ราบเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (ค) วิธีการวัดที่ใช้อุปกรณ์ราคาสูงกว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น แต่ราคาถูกกว่า Laser Doppler Anemometer ที่สามารถให้ผลการวัดแบบกึ่งต่อเนื่อง และต่อเนื่องได้ ได้แก่ ultrasonic flowmeter และ electromagnetic flowmeter เครื่องมือทั้งสองชนิดควรจะนำมาใช้ในการวัดอัตราการไหลของน้ำในระบบทำน้ำร้อนด้วยแสง-อาทิตย์ได้



## บรรณานุกรม

1. Close, D.J., "The Performance of Solar Water Heaters with Natural Circulation," *Solar Energy*, Vol.6, No.1, 1962, pp.33-40.
2. Gupta, C.L. and H.P. Garg, "System Design in Solar Water Heaters with Natural Circulation," *Solar Energy*, Vol.12, 1968, pp.163-182.
3. Klein, S.A., J.A. Duffie and W.A. Beckman, "Transient Considerations of Flat-Plate Solar Collectors," *ASME, J. Engng. Power*, 96A, 109, April 1974, pp.109-113
4. Ong, K.S., "A Finite-Difference Method to Evaluate the Thermal Performance of a Solar Water Heater," *Solar Energy*, Vol.16, No.3/4, Dec.1974, pp.137-147.
5. Ong, K.S., "An Improved Computer Program for the Thermal Performance of a Solar Water Heater," *Solar Energy*, Vol.18, No.3, 1976, pp.183-191.
6. Zvirin, Y., A. Shitzer and G. Grossman, "The Natural Circulation Solar Heater-Models with Linear and Nonlinear Temperature Distribution," *Int. J. Heat & Mass Transfer*, Vol.20, 1977, pp.997-999.
7. Shitzer, A., D. Kalmanoviz, Y. Zvirin and G. Grossman, "Experiments with a Flat Plate Solar Water Heating System in Thermosyphonic Flow," *Solar Energy*, Vol.22, No.1, 1979, pp.27-35.
8. Ho, Mau-Sun, "Thermosyphon Flow in Flat Plate Solar Collectors," M.Eng.Sc. Thesis, University of New South Wales, 1977.
9. Ranatunga, D.B.J., "Thermosyphon Flow in Solar Collectors," M. Eng. Sc. Thesis, University of New South Wales, 1978.

10. Morrison, G.L. and D.B.J. Ranatunga, "Transient Response of Thermosyphon Solar Collectors," Solar Energy, Vol.24, No.1 1980, pp.55-61.
11. Morrison, G.L. and D.B.J. Ranatunga, "Thermosyphon Circulation in Solar Collectors," Solar Energy, Vol.24, No.2, 1980, pp.191-198.
12. Toda, Kohji and Yoshiaki Shinoda, "Liquid Velocity Measurement using Interdigital Transducers," Proc. IEEE, Vol.69, No.1, 1981, pp.135-136.
13. ASHRAE Handbook and Product Directory, System Volume 1974.
14. Bliss, Jr., R.W., "The Derivations of Several 'Plate-Efficiency Factors' Useful in the Design of Flat-Plate Solar Heat Collectors," Solar Energy, Vol.3, 1959, p.55-64.
15. Yellott, J.I. and R. Sobotka, "An Investigation of Solar Water Heating Performance," ASHRAE Trans. 70, 1964, pp.425-433.
16. Whillier, A. and G. Saluja, "The Thermal Performance of Solar Water Heaters," Solar Energy, Vol.9, 1965, pp.21-26.
17. Chinnery, D.N.W., "Solar Water Heating in South Africa," CSIR Res. Rep., p.248, 1971.
18. Chinnappa, J.C.V. and K. Gnanalingam, "Performance at Colombo, Ceylon, of a Pressurized Solar Water Heater of the Combined Collector and Storage Type," Solar Energy, Vol.15, 1973, pp.195-204.
19. Hottel, H.C. and B.B. Woertz, "The Performance of Flat-Plate Solar-Heat Collectors," ASME Trans., Vol.64, 1942, pp.91-104.

20. Hottel, H.C. and A. Whillier, "Evaluation of Flat-Plate Solar-Collector Performance," Trans. Conf. on the Use of Solar Energy, University of Arizona, 1958, pp.74-104.
21. Iqbal, M., "Free Convection Effects Inside Tubes of Flat-Plate Solar Collectors," Solar Energy, Vol. 10, 1966, pp.207-211.
22. Phillips, W.F. and R.D. Cook, "Natural Circulation from a Flat Plate Collector to a Hot Liquid Storage Tank," ASME Paper No.75-HT-53, 1975.
23. Bairamov, R., K. Toiliev and M. Khodziev, "A Theoretical Determination of the Temperature in a Solar Water Heater (steady-state regime)," Int. Chem. Engng., Vol.16, 1976, pp.127-131.
24. Kirchhoff, R.H. and M. Billups, "A Two-Dimensional Heat Transfer Model of a Flat Plate Collector," ASME Paper No.76-WA/So 1-2, 1976.
25. Lipták, Béla G., Editor, "Instrument Engineers' Handbook, Volume I : Process Measurement," Chilton Book Company, Philadelphia, Copyright 1969 by Béla G. Lipták.
26. Doebelin, Ernest O., "Measurement Systems, (Application and Design)," Revised Edition, McGraw-Hill, Inc., N.Y., 1975.
27. Duffie, John A. and William A. Beckman, "Solar Energy Thermal Processes," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1974.
28. Sayigh, A.A.M., Editor, "Solar Energy Engineering," Academic Press, New York, 1977.
29. Langhaar, H.L., "Steady Flow in the Transition Length of a Straight Tube," ASME J. Appl. Mech., Vol.9, 1942, pp.55-58.

30. McAdams, W.C., "Heat Transmission," third edition, McGraw-Hill, Inc. New York, 1954.
31. Watmuff, J.H., W.W.S. Charters and D. Proctor, "Solar and Wind-induced External Coefficients Solar Collectors," *Comptes Intl. Revue d'Hellio Technique*, p.56, Sept. 1977.
32. Oliphant, M.V., "Measurement of Wind Speed Distributions across a Solar Collector," *Solar Energy*, Vol.24, No.4, 1980, pp.403-405.
33. Vennard, John K. and Robert L. Street, "Elementary Fluid Mechanics," 5th. edition (SI Version), John Wiley & Sons, Inc., New York, 1976.
34. Streeter, Victor L., "Fluid Mechanics," 6th. edition, McGraw-Hill, Inc., New York, 1975.
35. Bennett, C.O. and J.E. Myers, "Momentum, Heat and Mass Transfer," 2nd. edition, McGraw-Hill, Inc., New York, 1974.
36. Bird, R. Byron, Warren E. Stewart and Edwin N. Lightfoot, "Transport Phenomena," John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 1960.
37. John, James E.A. and William L. Haberman, "Introduction to Fluid Mechanics," Prentice-Hall, New Jersey, 1971.
38. Fox, Robert W. and Alan T. McDonald, "Introduction to Fluid Mechanics," 2nd. edition, John Wiley & Sons, New York, 1978.
39. Nikuradse, J., "Strömungsgesetze in rauhen Rohren," *VDI-Forschungsheft*, 361, 1933.
40. Colebrook, C.F., "Turbulent Flow in Pipes, with Particular Reference to the Transition Region Between the Smooth and Rough Pipe Laws," *J. Inst. Civil Engrs.*, London, Feb. 1939, pp.133-156.
41. Moody, L.F., "Friction Factors for Pipe Flow," *Trans. ASME*, Vol.66, 1944, pp.671-684.

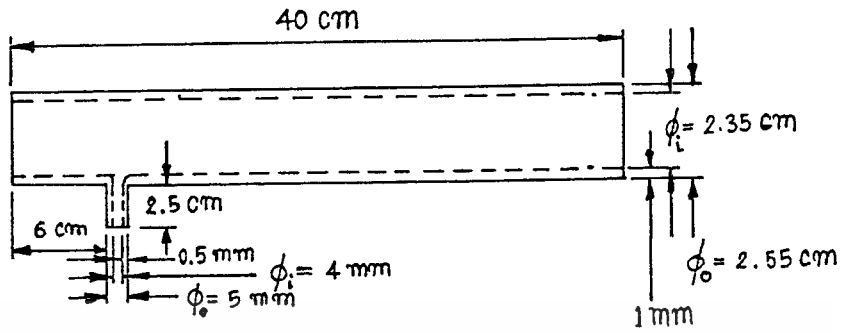
42. Weisbach, Julius, "Die Experimental-Hydraulik," Englehardt, Freiburg, 1855.
43. Hydraulic Institute, "Pipe Friction Manual," 3rd. edition, 1961.
44. Itō, H., "Pressure Losses in Smooth Pipe Bends," Trans. ASME (Series D), Vol.82, No.1, 1960.
45. Holman, J.P., "Heat Transfer," 4th. edition, McGraw-Hill, Inc., New York, 1976.
46. Kreith, F., "Principles of Heat Transfer," 3rd. edition, International Textbook Co., Scranton, Pa., 1973.
47. Diefenderfer, A. James, "Principles of Electronic Instrumentation," W.B. Saunders Company, Pa., 1972.
48. The Omega Engineering, Inc., "1977 Temperature Measurement Handbook," 2nd. edition, 1977.
49. Harvey, Glenn F., Editor, "Standards and Practices for Instrumentation," 4th: edition, Instrument Society of America, Pittsburgh, Pa., 1974.
50. "Testing of Solar Collectors and Systems," Conference (C 11), at the Royal Institution, London, April 1977.
51. Anderson, Bruce, "Solar Energy Fundamentals in Building Design," McGraw-Hill, Inc., New York, 1977.
52. ดร. กฤษณพงศ์ กีรติกร, "ผิวเลือกรังสี" สัมมนาวิชาการเรื่อง พลังงานหมุนเวียนและการประยุกต์ จัดโดยสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) ร่วมกับ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตธนบุรี, 25-28 กุมภาพันธ์ 2523.
53. Cooper, P.I. and R.V. Dunkle, "A Non-linear Flat-Plate Collector Model," Solar Energy, Vol.26, No.2, 1981, pp.133-140.

54. Gordon, J.M., "On Non-linear Effects in Flat-Plate Collector Efficiency Curves," Solar Energy, Vol.26, No.3, 1981, pp.265-266.
55. "Incidence Rate of Harmful Power Line Disturbances," IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, July-August 1974.
56. Ott, Henry W., "Noise Reduction Techniques in Electronic Systems," Wiley-Interscience, Copyright 1976 by Bell Telephone Lab., Inc., 1976.
57. Morrison, Ralph, "Grounding and Shielding Techniques in Instrumentation," 2nd. edition, Wiley-Interscience, 1977.
58. Morrison, Ralph, "Answers to Grounding and Shielding Problems," Instr. and Cont. Systems, Vol.52, No.6, June 1979, pp.35-38.
59. SGL Industries, Inc., "Power Master :- Line Monitor Power Conditioners," 1981 Catalog.
60. Driscoll, Frederick F. and Robert F. Coughlin, "Solid State Devices and Applications," Prentice-Hall, Inc., N.J., 1975.
61. Coughlin, Robert F. and Frederick F. Driscoll, "Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits," Prentice-Hall, Inc., N.J., 1977.
62. Intersil Data Book, July 1979.
63. Motorola, "CMOS Data Book," 1978.
64. Lancaster, Don, "CMOS Cookbook," Howard W. Sams & Co., Inc., Indiana, 1977.
65. Motorola, "Voltage Regulator Handbook," 1976.
66. NS, "Voltage Regulator Handbook," May 1975.

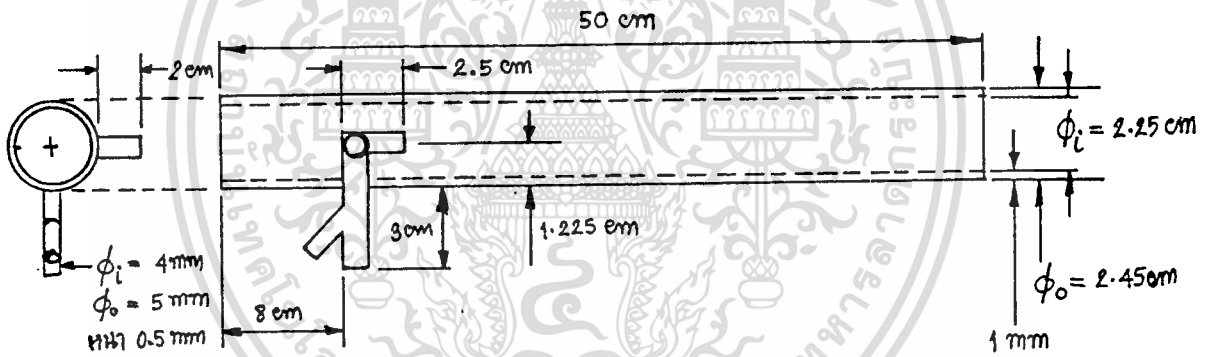
67. Foust, Alan S., et. al., "Principles of Unit Operations," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1960.
68. Perry, Robert H. and Cecil H. Chilton, "Chemical Engineers' Handbook," 5th. edition, McGraw-Hill, Inc., New York, 1973.
69. Hewlett Packard, "Optoelectronics Designer's Catalog," 1979.





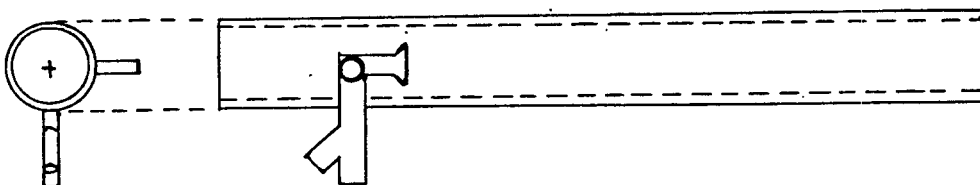


รูปที่ 1 หลอดแก้วแบบที่ 1

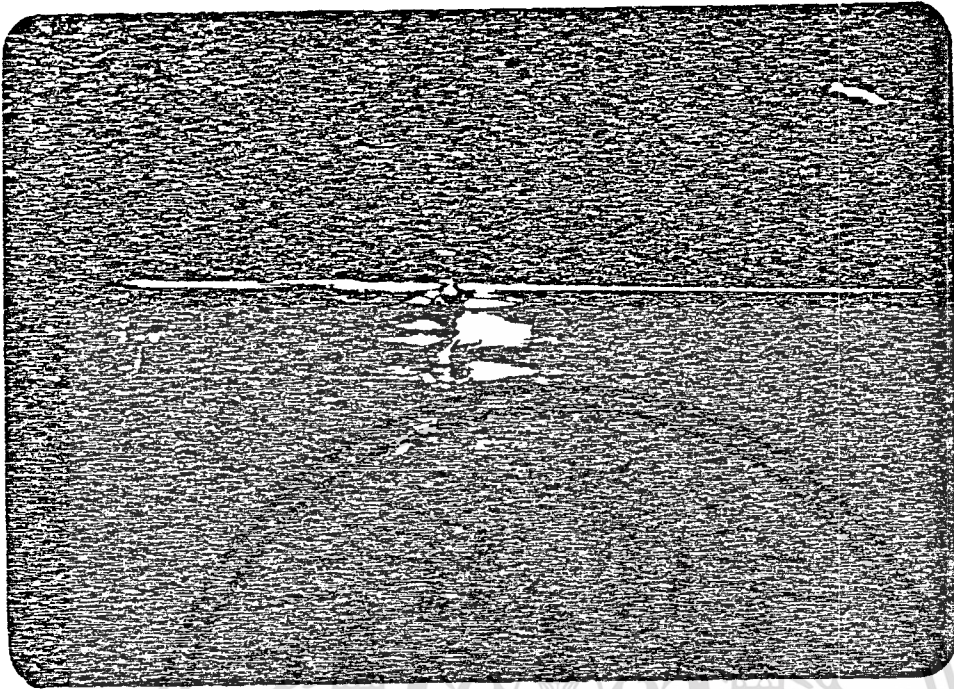


รูปที่ 2 หลอดแก้วแบบที่ 2

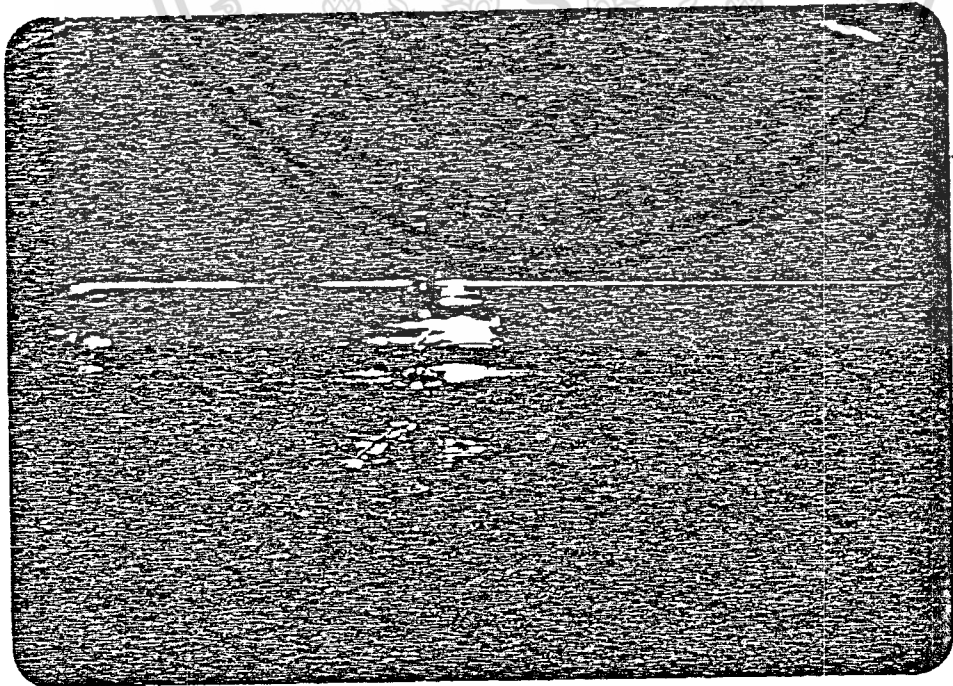
ขนาดเท่ากับหลอดแก้วแบบที่ 2



รูปที่ 3 หลอดแก้วแบบที่ 3

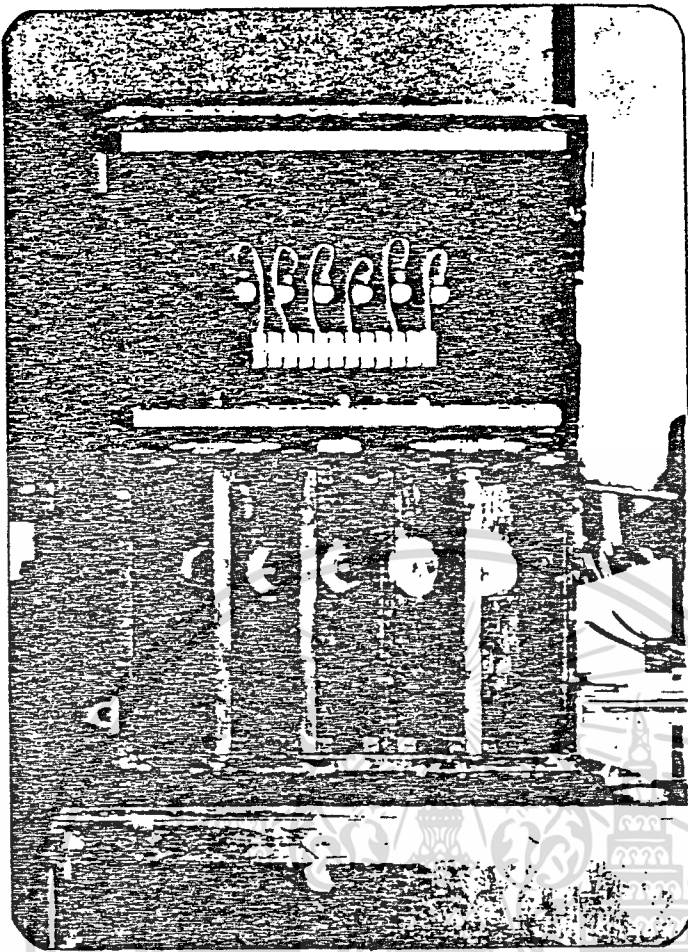


รูปที่ 4 หลอดแก้วแบบที่ 2

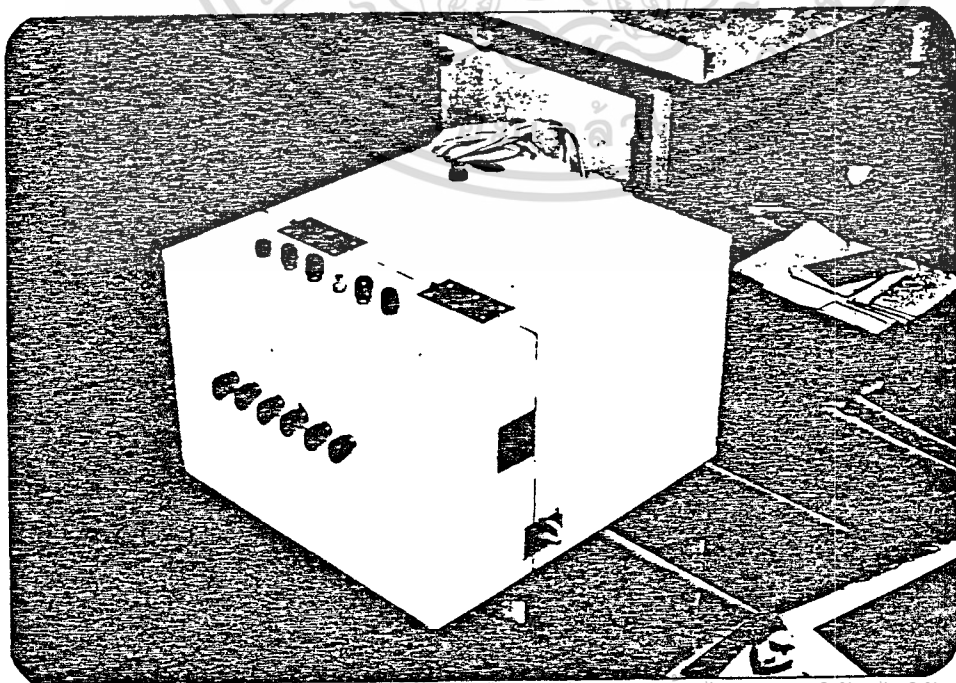


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 5 ซึ่งงานเพื่อ หลอดแก้วแบบที่ 3 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



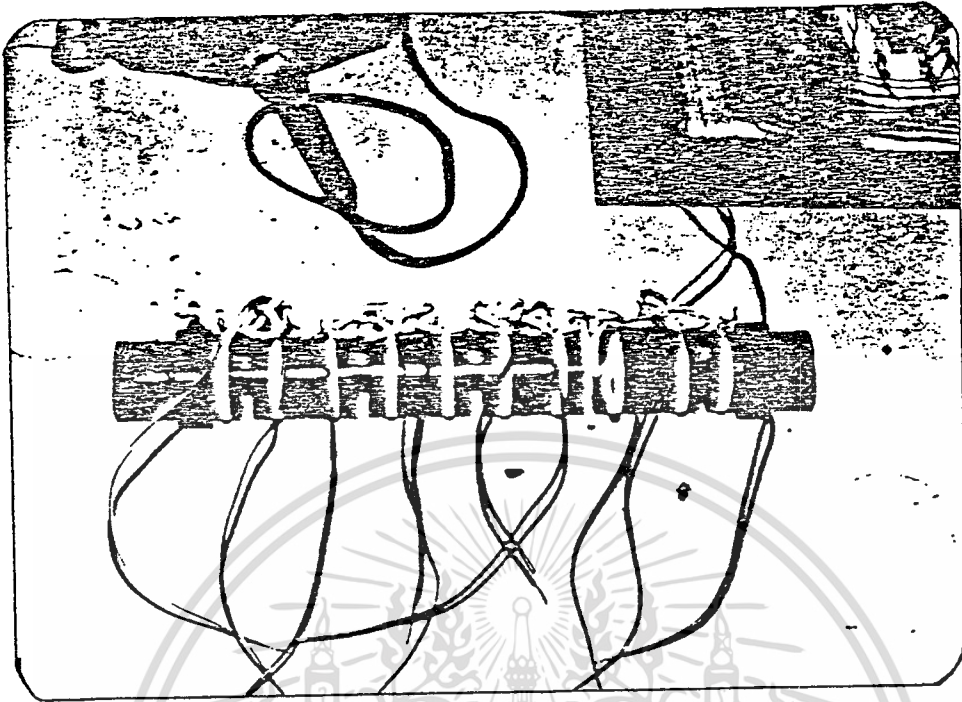


รูปที่ 8 ภายในแหล่งกำเนิดแสง

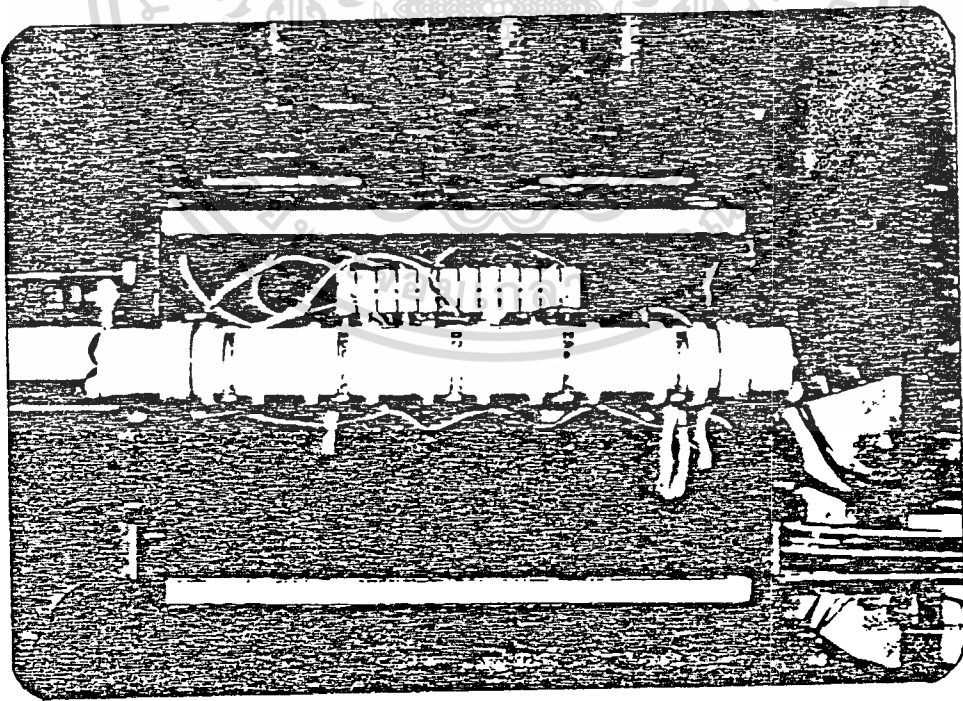


เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



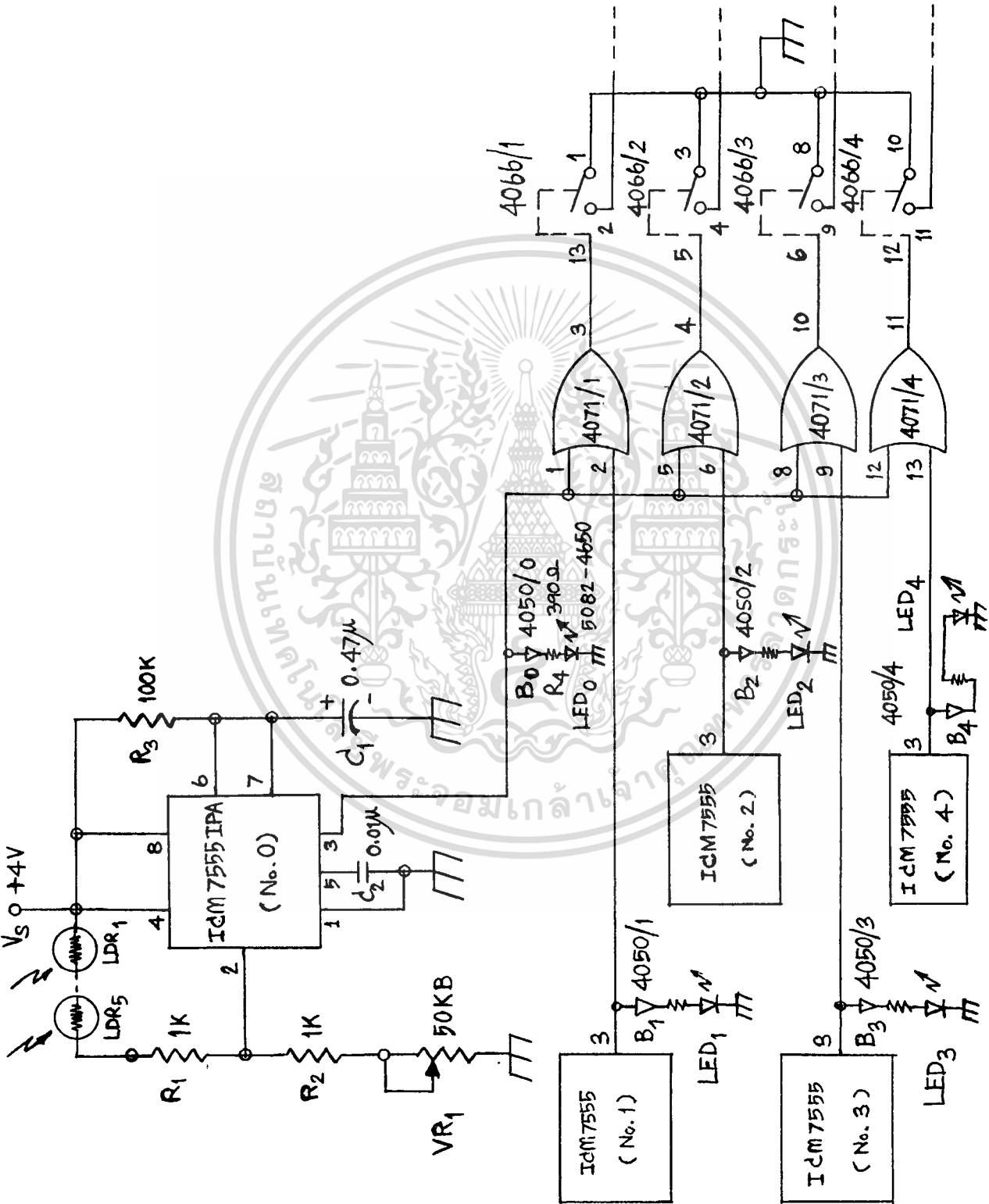
รูปที่ 10 ซอด้วง



รูปที่ 11 ซอด้วงที่ประกอบเข้ากับแหล่งกำเนิดแสง

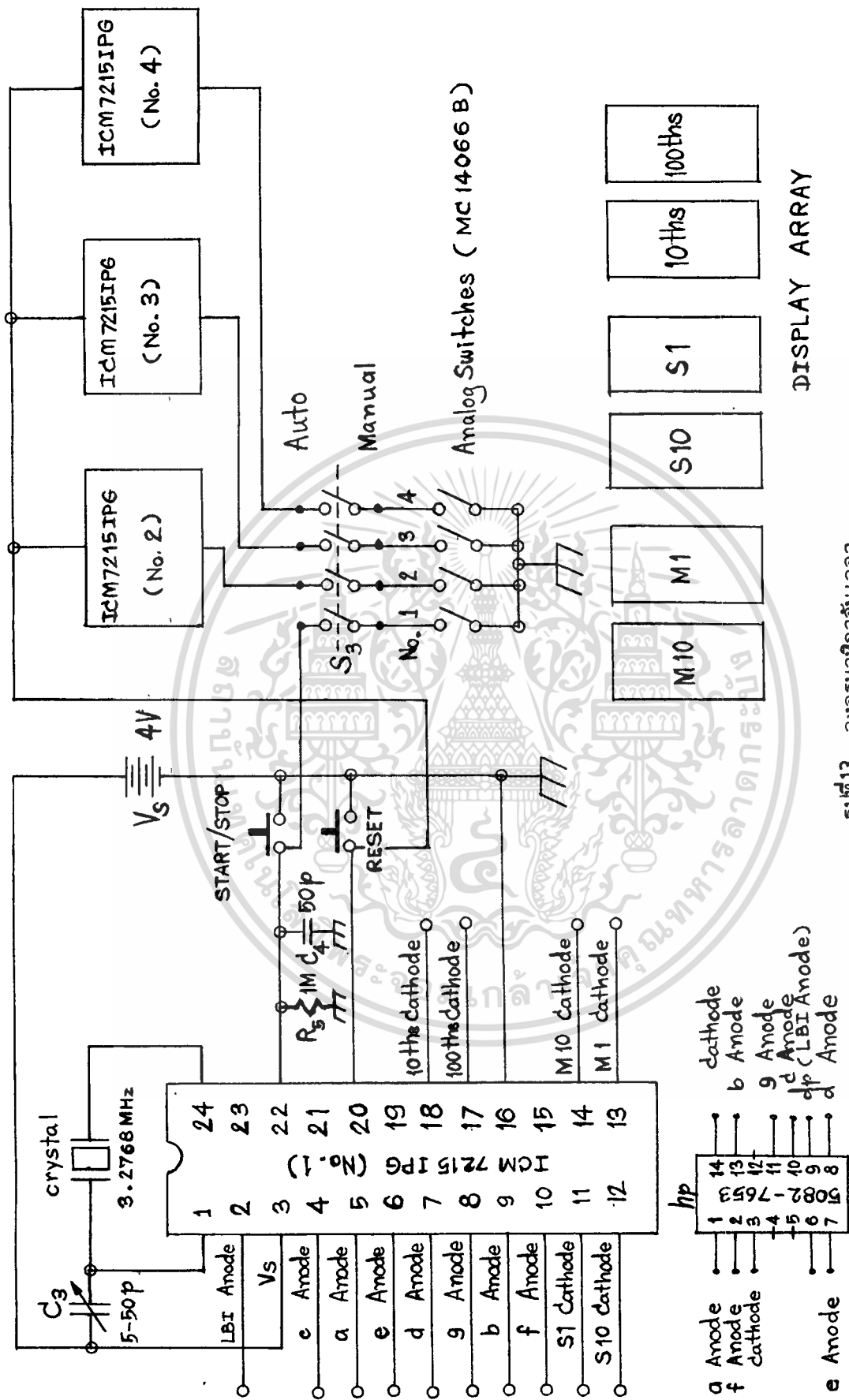
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๗-1.3 การออกแบบวงจรของอุปกรณ์จับเวลาอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 12 วงจร Detector, OR Gate, Analog Switch และ Buffer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

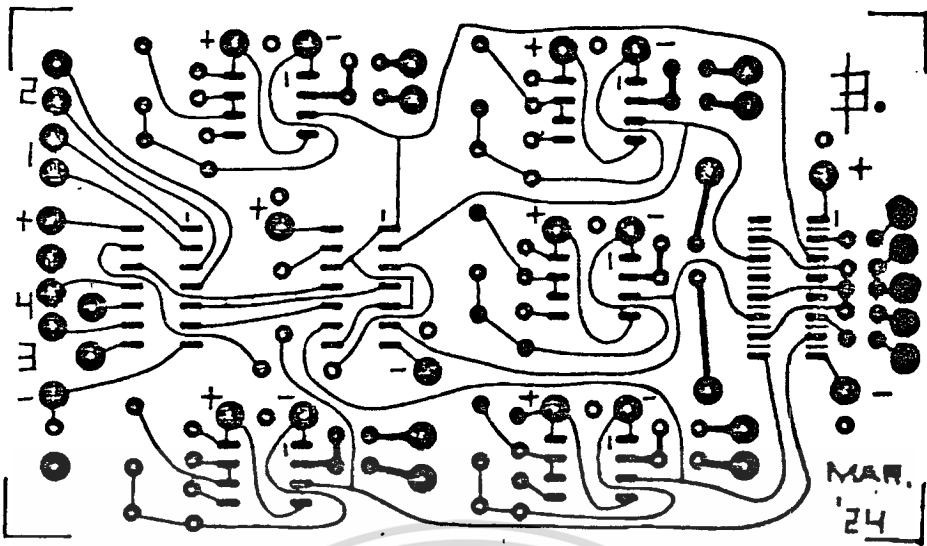


รูปที่ 13 วงจรนาฬิกาจับเวลา

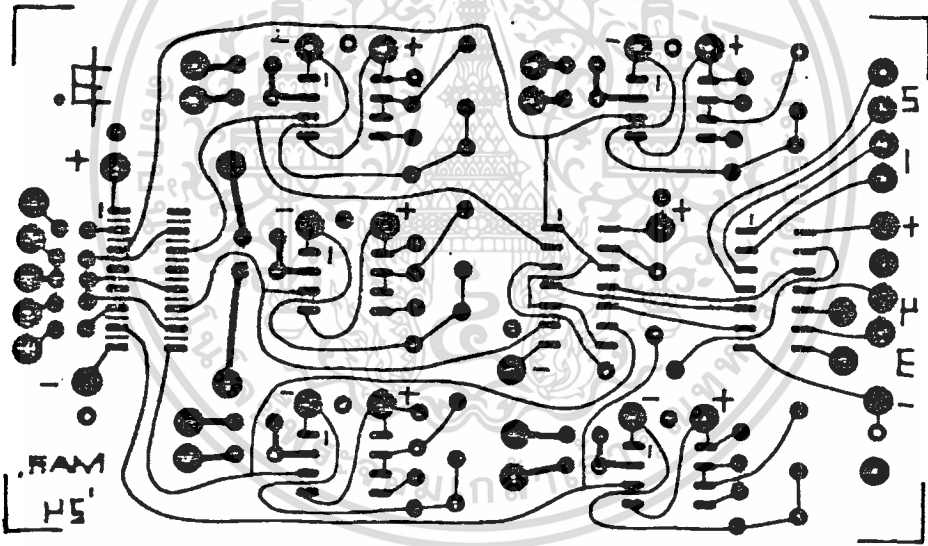
7-SEGMENT LED DISPLAY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

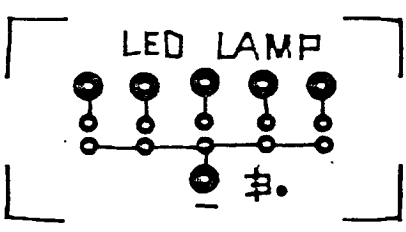




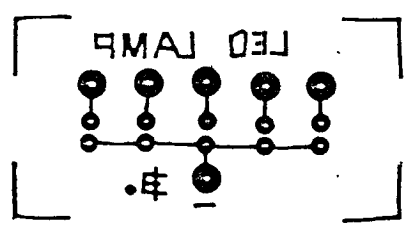
รูปที่15 Detector, OR Gate, Analog Switch และ Buffer-ด้านหลัง



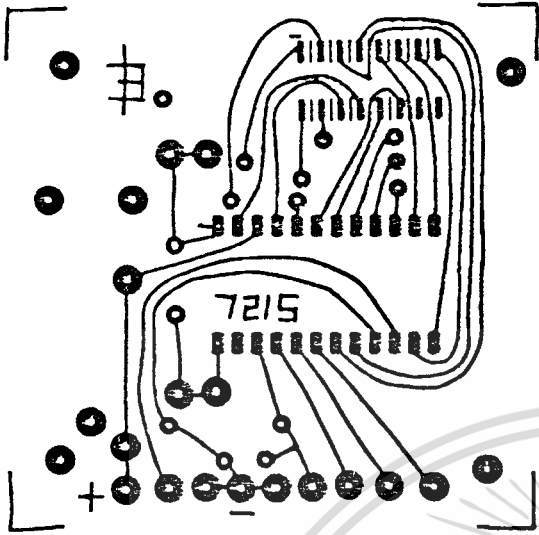
รูปที่16 Detector, OR Gate, Analog Switch และ Buffer-ด้านหน้า



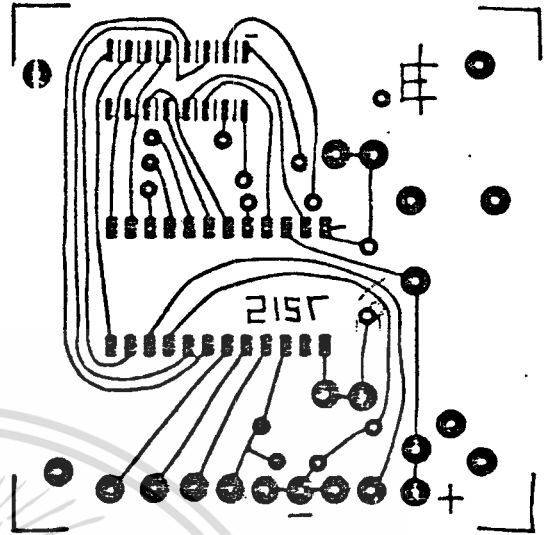
รูปที่17 LED LAMP-ด้านหลัง



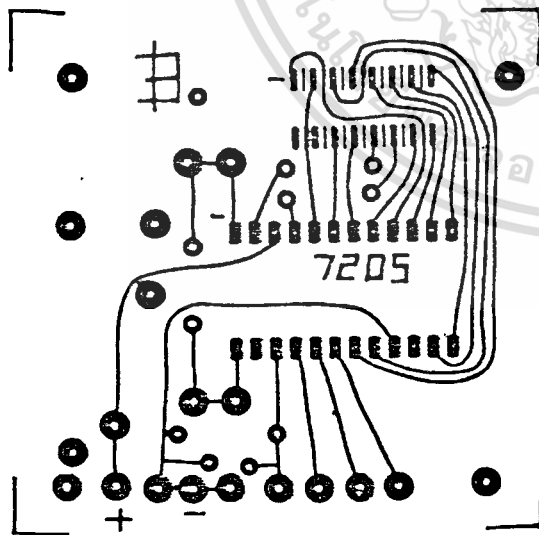
รูปที่18 LED LAMP-ด้านหน้า



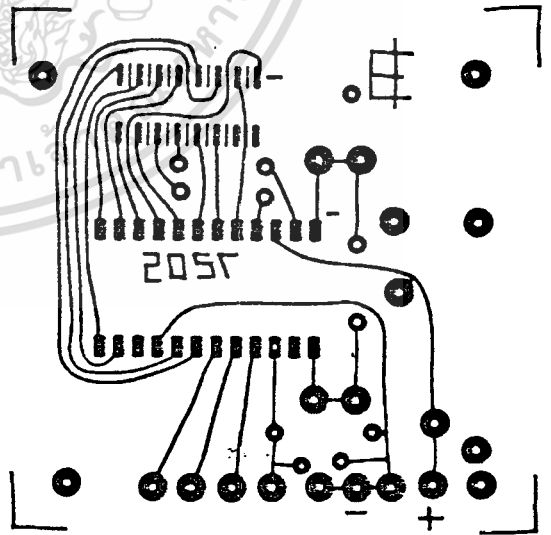
รูปที่ 18 ICM 7215-ด้านหลัง



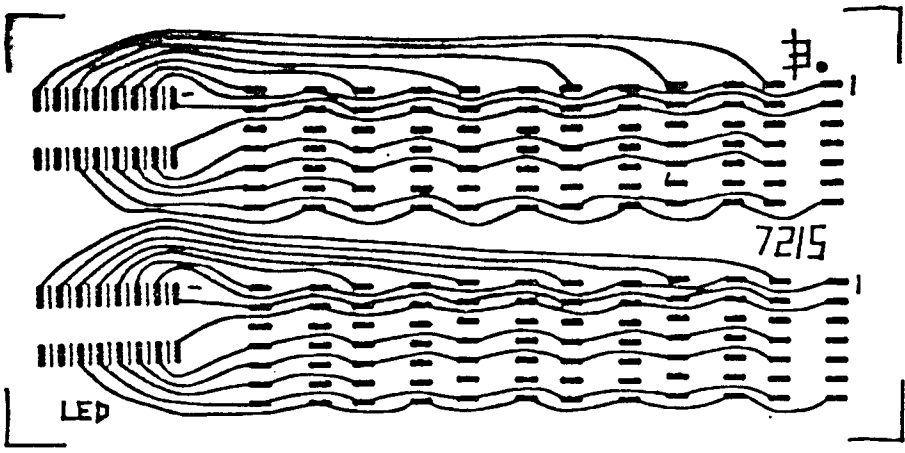
รูปที่ 19 ICM 7215-ด้านหน้า



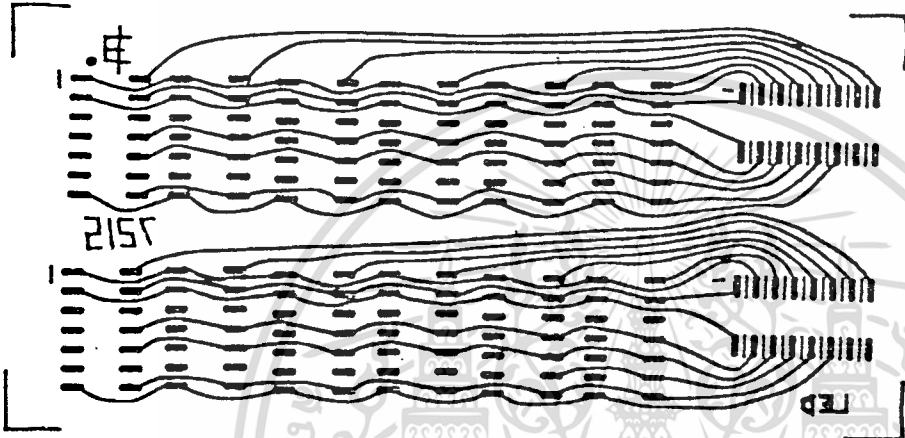
รูปที่ 20 ICM 7205-ด้านหลัง



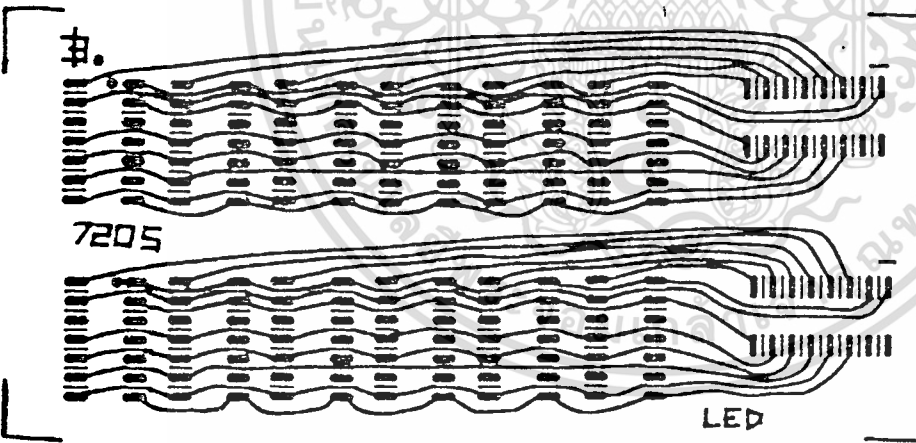
รูปที่ 21 ICM 7205-ด้านหน้า



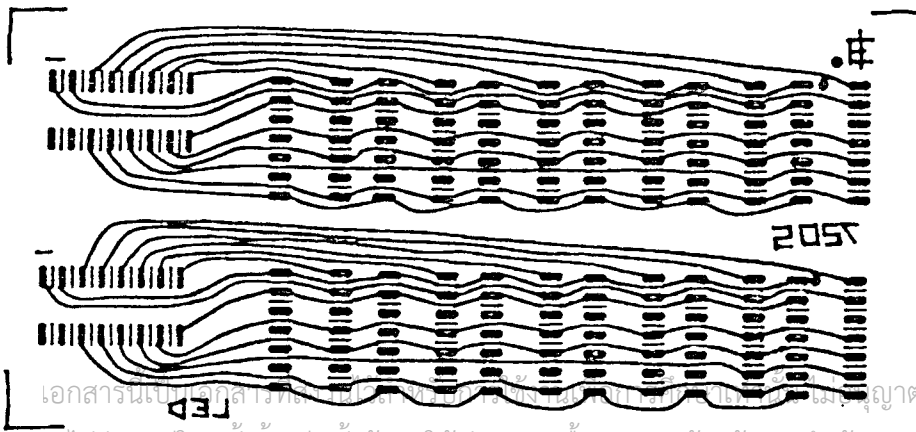
รูปที่ 22 LED Display  
ด้านหลัง



รูปที่ 23 LED Display  
ด้านหน้า



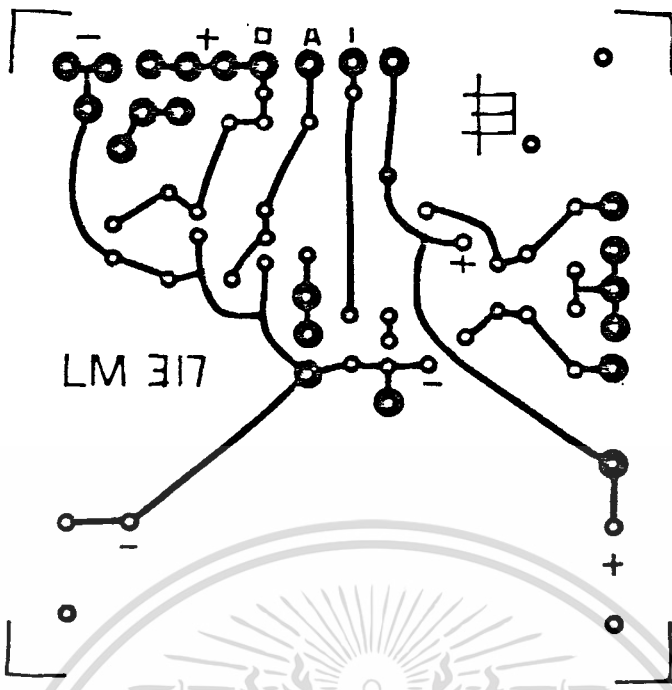
รูปที่ 24 LED Display  
ด้านหลัง



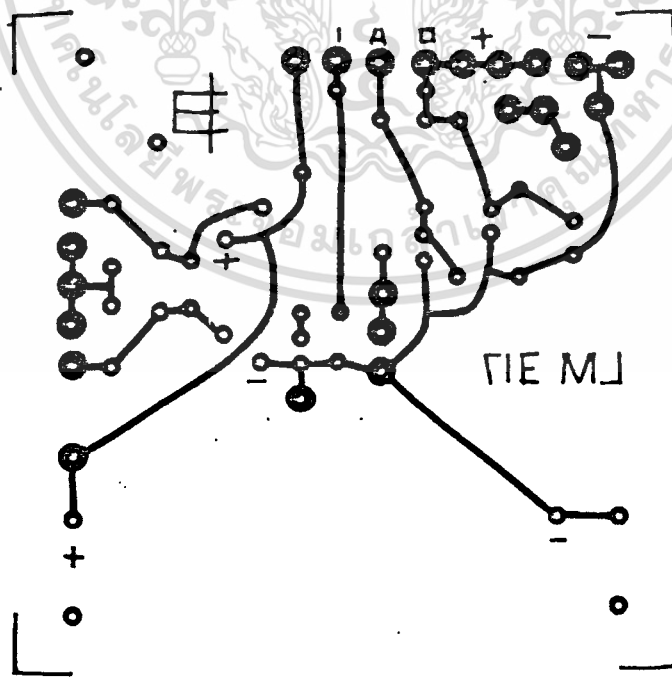
รูปที่ 25 LED Display  
ด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



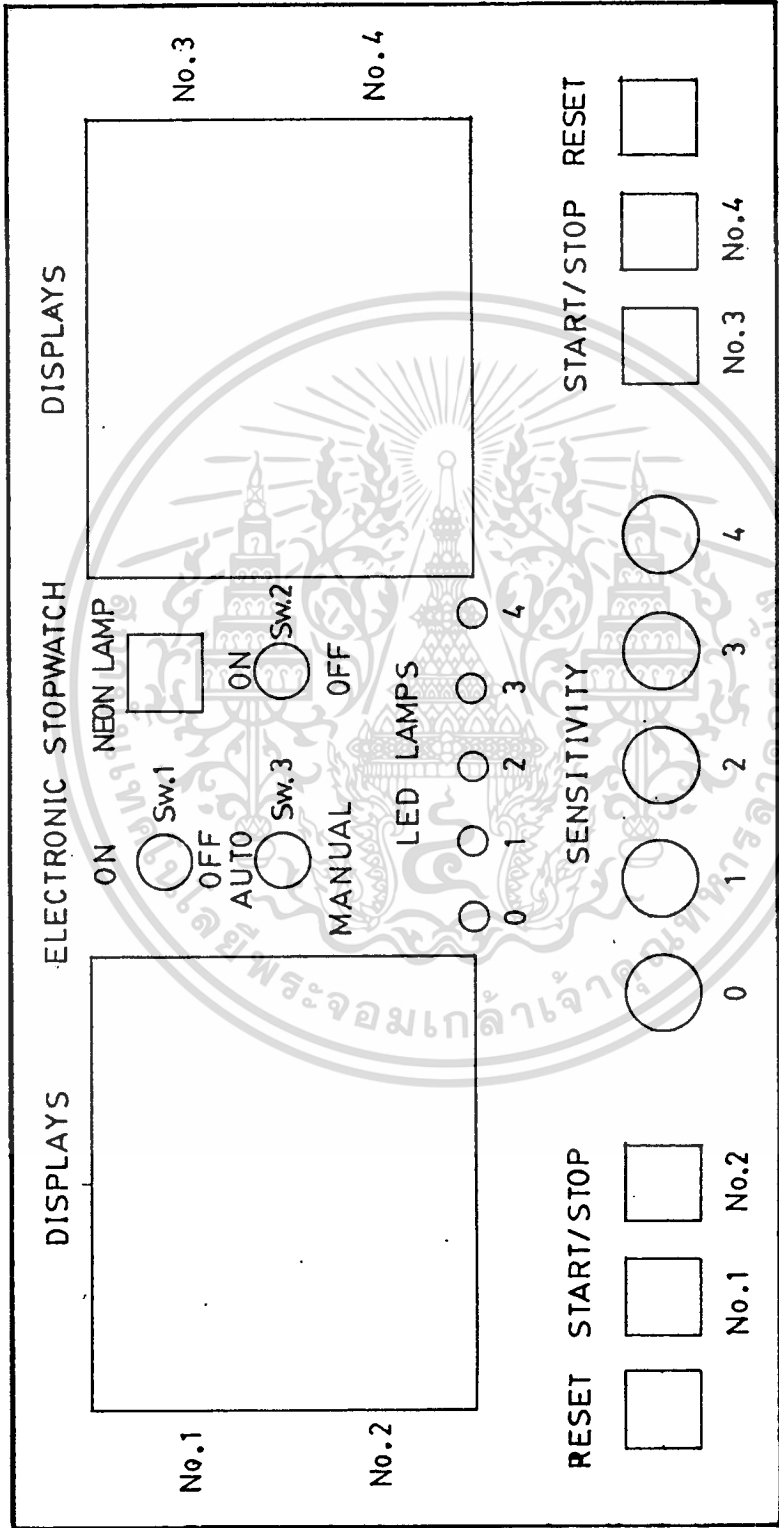
รูปที่ 26 วงจรแหล่งจ่ายกำลัง-ด้านหลัง



รูปที่ 27 วงจรแหล่งจ่ายกำลัง-ด้านหน้า

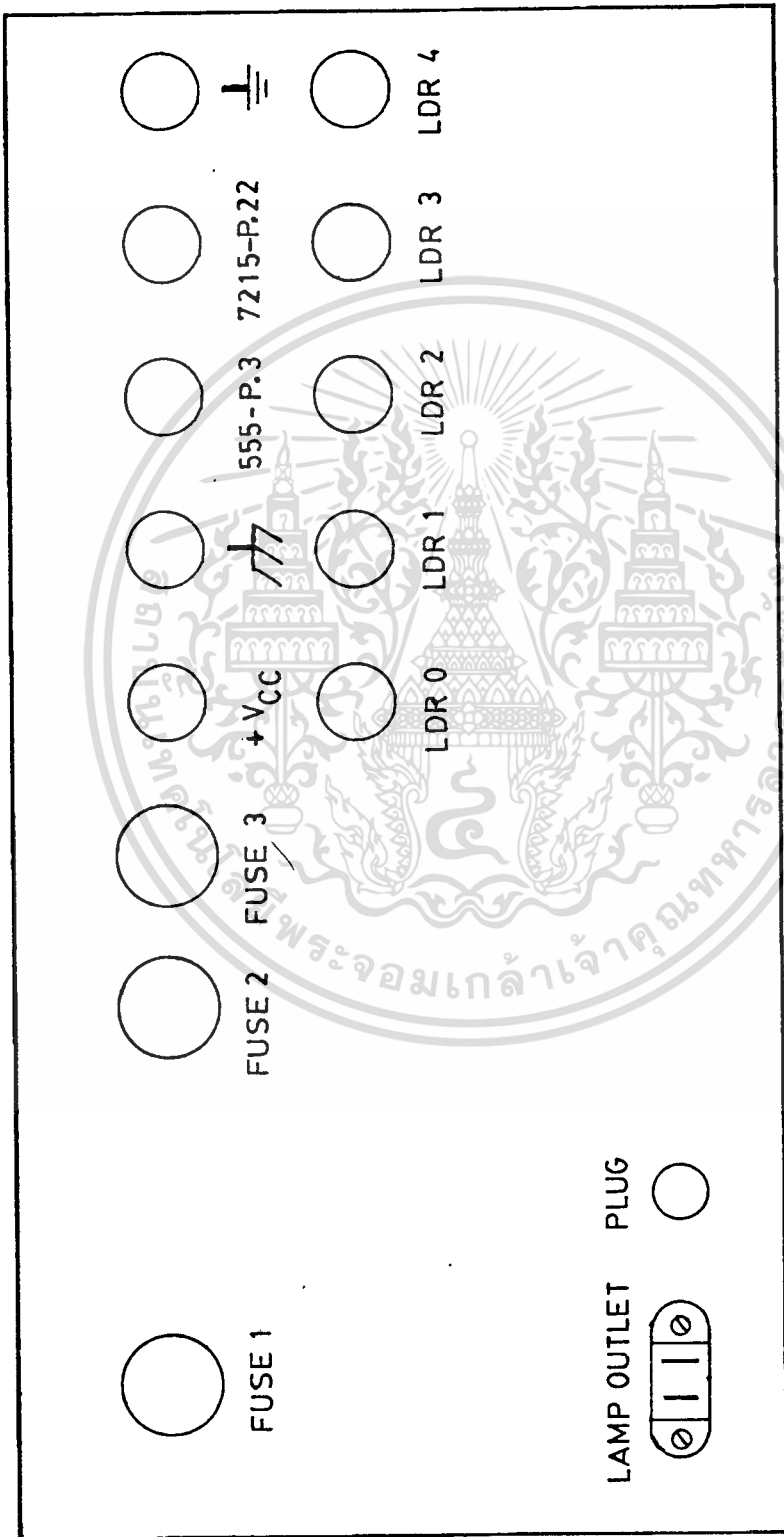
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

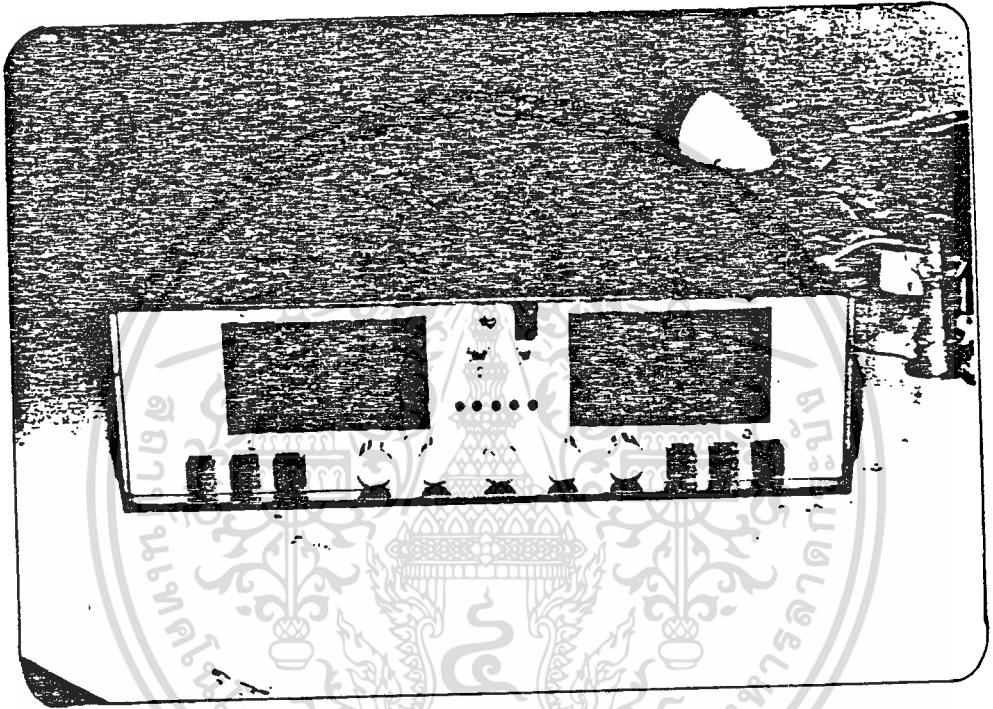


รูปที่ 28 ด้านหน้าของอุปกรณ์จับเวลาอิเล็กทรอนิกส์

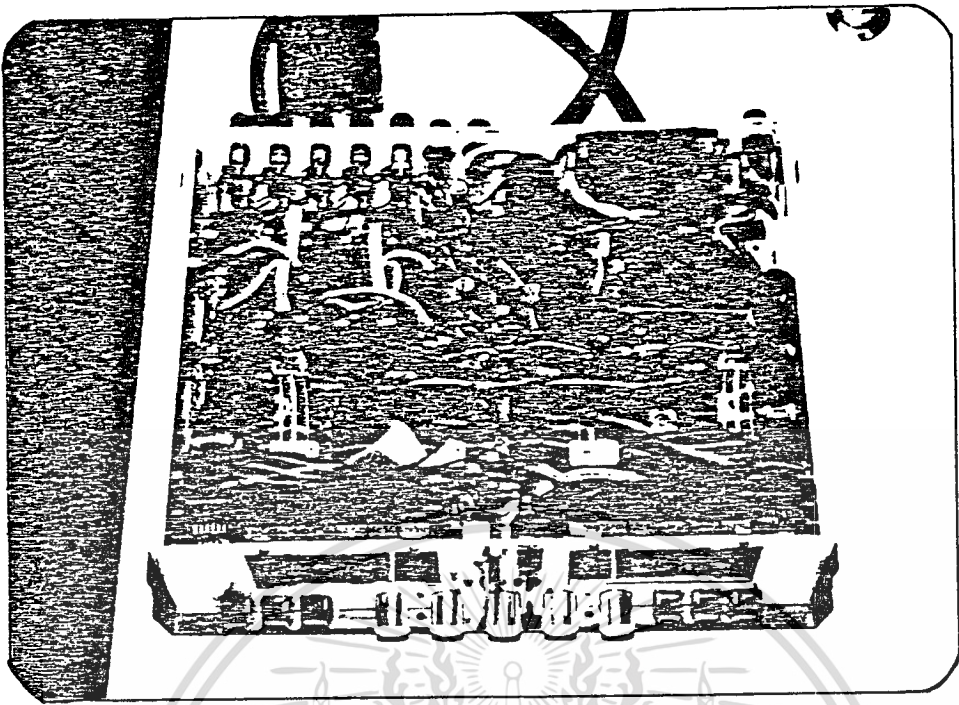
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



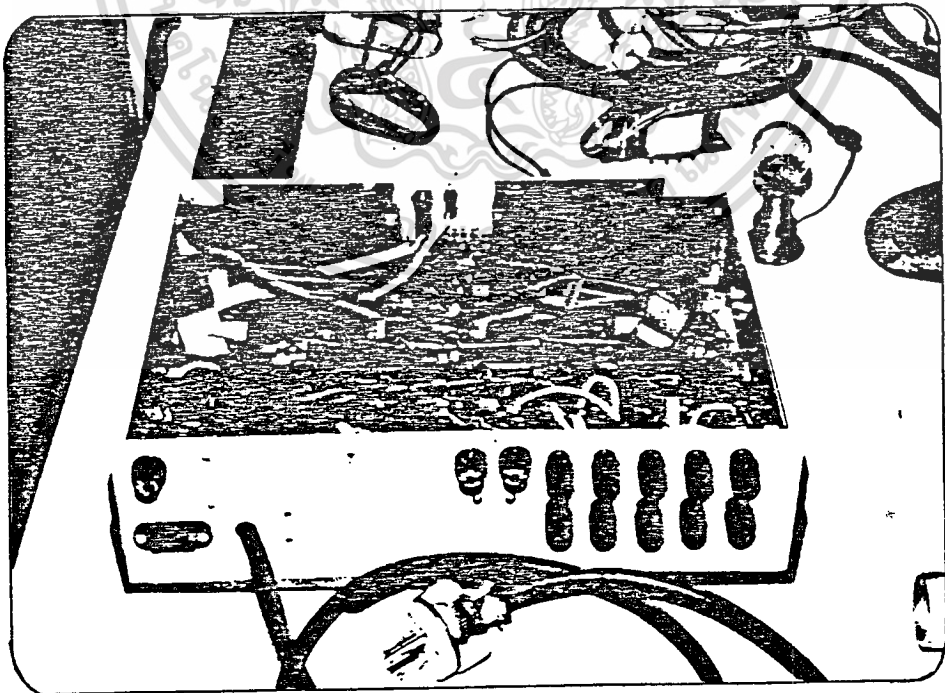
รูปที่ 29 ด้านหลังของอุปกรณ์จับเวลาอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 30 หน้าปัทม์อุปกรณ์จับเวลาอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 31 ด้านหน้า-ภายในอุปกรณ์จับเวลาอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 32 ด้านหลัง-ภายในอุปกรณ์จับเวลาอิเล็กทรอนิกส์

#### ผ-1.4 สาเหตุของสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าและวิธีการแก้ไข [55-59]

สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุด้วยกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ 1) Voltage Spikes และ 2) Noise Interference (ซึ่งมักจะเรียกว่า "hash")

##### 1) Voltage Spikes

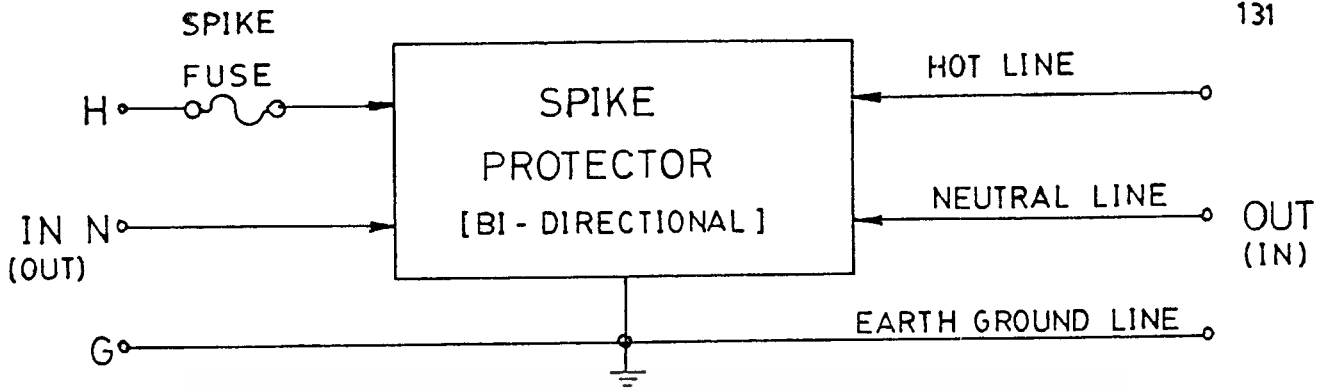
Spike เป็น overvoltage ซึ่งสามารถที่จะแบ่งออกได้เป็นแบบ transient (ศักดาไฟฟ้าสูงประมาณ 6000 โวลท์และมากกว่า ซึ่งมีช่วงเวลาดันคือน้อยกว่า 100  $\mu$ sec และแบบ power surge (ศักดาไฟฟ้ามีค่าจนถึง 3000 โวลท์ แต่มีช่วงเวลายาว) Overvoltage ที่มีค่าสูงถึง 2000 โวลท์ (สำหรับไฟ 220 V) มักจะเกิดขึ้นเป็นประจำในโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับบ้านพักอาศัยก็จะเกิดน้อยลง ถ้าเกิด voltage spike ขึ้นในสายส่งที่จ่ายไฟให้กับเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ ก็จะทำให้เครื่องมือนั้นเสียหายได้ เช่น ทำลายพวกอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ฉนวน ลบข้อมูลที่หน่วยความจำ เป็นต้น หรือทำให้เครื่องมือมีอายุการใช้งานได้น้อยลง

##### สาเหตุของการเกิด Voltage Spikes

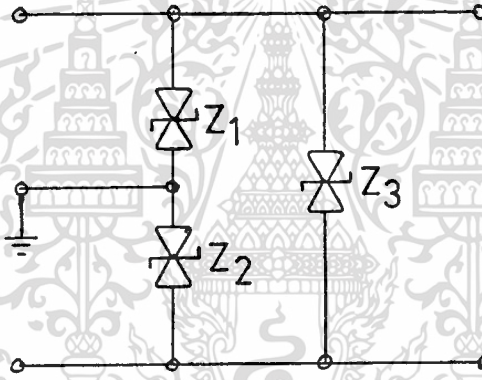
1. การเปิด-ปิด ของมอเตอร์
2. การรับและจ่ายพลังงานของ relay ทรานส์ฟอมเมอร์ หรือ solenoids
3. การเกิด overvoltage เนื่องจากการ switch ของ generator เมื่อเกิด heavy load
4. เมื่อมีการแก้ไข undervoltage จะทำให้เกิด surge ตามมา
5. เกิดจากฟ้าผ่า
6. เกิดจากการลัดวงจร หรือการกราวนอย่างทันทีทันใดของวงจรไฟฟ้า

##### วิธีแก้ไข Voltage Spikes

ใช้ varistor เป็นตัวกำจัดสัญญาณ voltage spikes



รูปที่ 33



$Z_1, Z_2, Z_3 = 3 \times Z10L471$

รูปที่ 34 วงจรที่ใช้

2) Noise Interference

เป็นสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการแต่มีจะเกิดขึ้นอยู่เสมอ สัญญาณที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็ก ๆ ซึ่งไม่สามารถทำลายเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ได้ แต่ก็ทำให้เครื่องมือเสื่อมคุณภาพลงและสามารถลบข้อมูลที่หน่วยความจำได้

เราแบ่ง noise interference ออกเป็น 3. แบบคือ

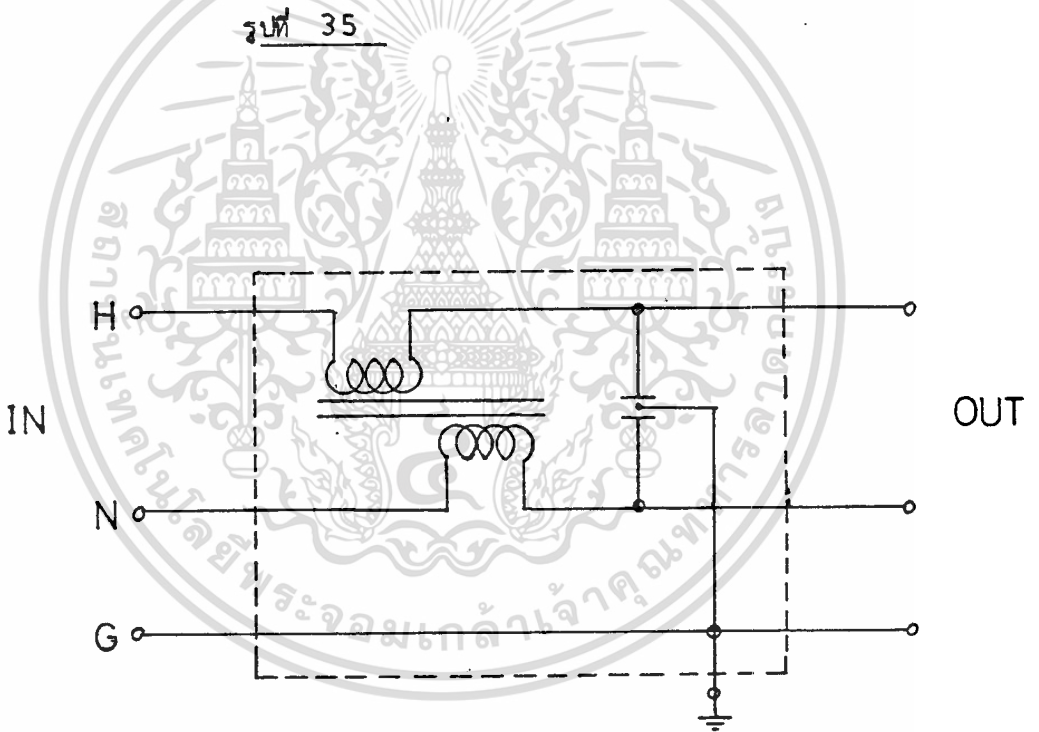
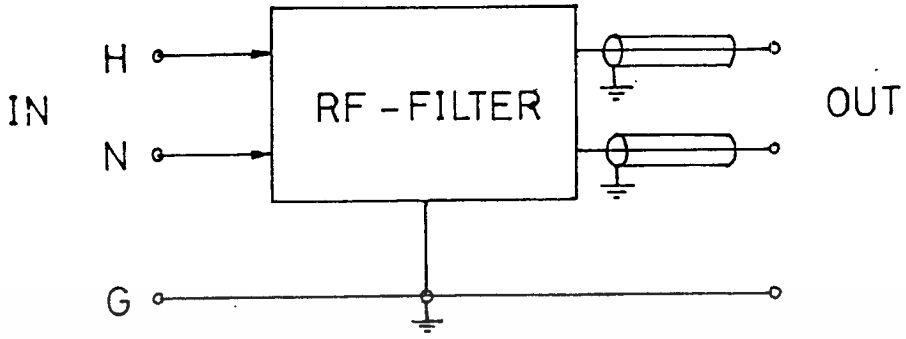
- ก. Electromagnetic Interference (EMI) ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก
- ข. Radio Frequency Interference (RFI) ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่สายไฟฟ้าคู่เหมือนเป็นสายอากาศ
- ค. Electromagnetic Pulse (EMP) เป็นสัญญาณพัลส์ของพลังงานที่เกิดจากการกลับตัวอย่างทันทีทันใดของสนามแม่เหล็ก เช่น พายุฟ้าผ่า

#### สาเหตุของการเกิด Noise Interference

1. สาเหตุเหมือนกับ การเกิด Voltage Spikes แต่มีขนาดของสัญญาณเล็กกว่ามาก
2. ตัวที่ทำให้เกิด electrical noise
  - แสงฟลูออเรสเซนต์
  - คอมพิวเตอร์ และ เครื่องจักรที่กำลังทำงาน
  - อุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น ปลั๊กไฟ
  - การจุดระเบิดของรถยนต์
  - เครื่องส่งวิทยุ โทรทัศน์
  - ทรานส์ฟอมเมอร์
  - จุดดับในดวงอาทิตย์
  - อื่น ๆ

#### วิธีแก้ไข Noise Interference

1. กรรณัม หรือ ใช้สายซิลด์เท่าที่จำเป็น เพื่อกำจัด EMI และ EMP
2. อย่าให้มี ground loop
3. ใช้ RF filter กำจัดสัญญาณ RFI



รูปที่ 36 วงจรที่ใช้ ใช้ Stanley Noise Suppressor

Type SSND-0300B ; AC 250V, 3A

### ผ-1.5 ราคาอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วน้ำ

ชุดฉีดหยดน้ำมัน	ราคาประมาณ	400	บาท
แหล่งกำเนิดแสง	ราคาประมาณ	350	บาท
ชุดตรวจจับ	ราคาประมาณ	450	บาท
อุปกรณ์จับเวลาอิเล็กทรอนิกส์	ราคาประมาณ	6,000	บาท
<b>รวมราคาประมาณ</b>		<b>7,200</b>	<b>บาท</b>

หมายเหตุ: ยังไม่ได้คิดราคาน้ำมันผสม เพราะฉะนั้นอยู่กับปริมาณที่ใช้

### ผ-1.6 การเตรียมน้ำมันผสม

ในการพิจารณาเลือกสารที่จะนำมาผสมให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการ มีหลักการดังนี้ คือ

1. ใช้สารที่มี ถ.พ. มากกว่า 1 และน้อยกว่า 1 มาผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม
2. สารทั้งสองต้องไม่ละลายน้ำและสามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี (คือ สารอินทรีย์)
3. สารทั้งสองต้องทึบแสง ถ้าไม่ทึบแสงก็ต้องสามารถละลายอินทรีย์ได้
4. เป็นสารที่หาง่าย ราคาถูก และไม่อันตราย

ดังนั้นจึงเลือก Carbon tetrachloride( $\text{CCl}_4$ ) ซึ่งมี ถ.พ. มากกว่า 1 [ดูภาคผนวกที่ 2]ผสมกับ น้ำมัน 4 ชนิด ซึ่งมี ถ.พ. น้อยกว่า 1 คือ น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว น้ำมันดีเซลหมุนช้า น้ำมันหล่อลื่น TALPA 30 น้ำมันหล่อลื่น VITREA 220 [ดูภาคผนวกที่ 2]และใช้ KIWI สีดำ เป็นสารที่ทำให้ทึบแสง

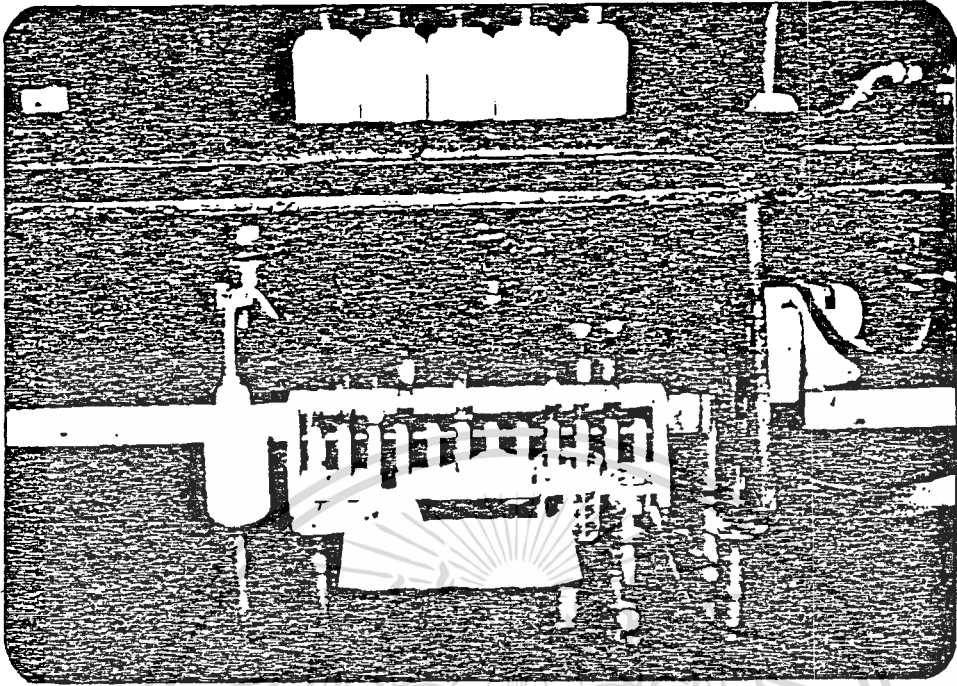
วิธีผสมน้ำมันผสมทำดังนี้

- ก. ใช้น้ำมันละลาย KIWI สีดำ จนสีกระจายสม่ำเสมอโดยการใช้แท่งแก้วกวน
- ข. เติม  $\text{CCl}_4$  ลงไปทีละน้อย จนกว่าจะได้ ถ.พ.ของน้ำมันผสมตามที่ต้องการ

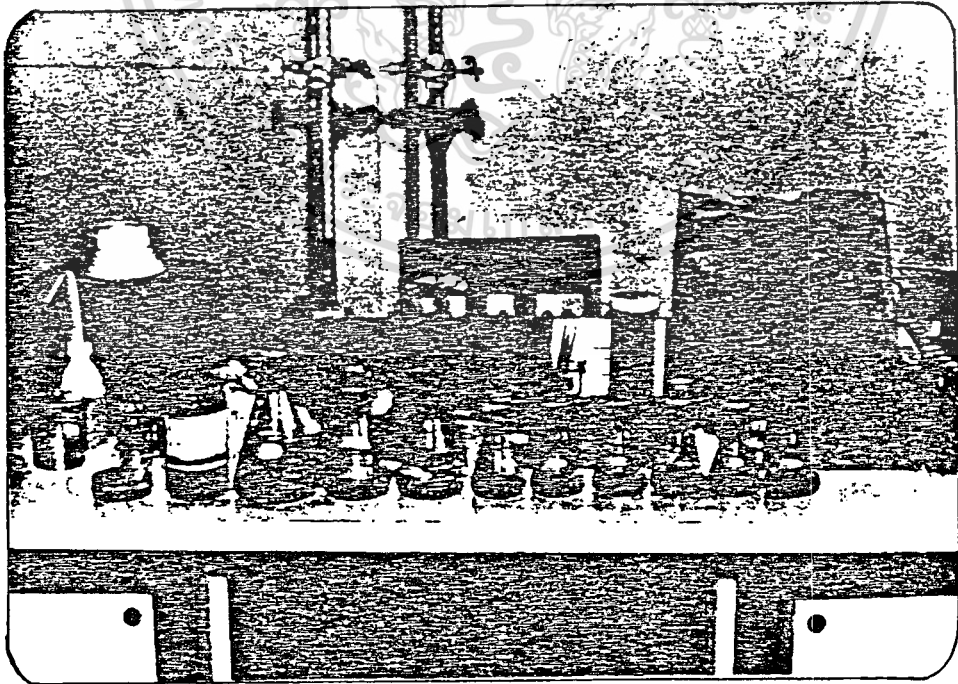
ในการทดสอบ ถ.พ.ของน้ำมันผสม ทำได้โดยการใช้ที่หยดสาร หยคน้ำมันผสมลงไป  
ในน้ำ แล้วดูลักษณะการเคลื่อนที่ว่าจะจมลงหรือลอยขึ้น ถ้า ถ.พ.ของหยคน้ำมันผสมเท่ากับ ถ.พ.ของ-  
น้ำ หยคน้ำมันผสมจะหยุดอยู่กับที่

อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำมันและ  $CCl_4$  เท่ากับ 3 ต่อ 1 (โดยประมาณ)





รูปที่ 37 ชุดผสมน้ำมัน



รูปที่ 38 น้ำมันที่ผสมแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประกอบการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



Table 3-28. Density of Pure Water Free from Air, 0° to 41°C.\*

°C.	Tenths of degrees										Mean differences
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0	0.999868	8747	8812	8875	8936	8996	9053	9109	9163	9216	+59
1	9267	9315	9363	9408	9452	9494	9534	9573	9610	9645	+41
2	9679	9711	9741	9769	9796	9821	9844	9866	9887	9905	+24
3	9922	9937	9951	9962	9973	9981	9988	9994	9998	0.0000	+8
4	1.000000	9999	9996	9992	9986	9979	9970	9960	9947	9934	-8
5	0.9999	9919	9902	9884	9864	9842	9819	9795	9769	9742	-24
6	9682	9650	9617	9582	9545	9507	9468	9427	9385	9341	-39
7	9296	9249	9201	9151	9100	9048	8994	8938	8881	8823	-53
8	8764	8903	8641	8577	8512	8445	8377	8308	8237	8165	-67
9	8091	8017	7940	7863	7784	7704	7622	7539	7455	7369	-81
10	7282	7194	7105	7014	6921	6826	6729	6632	6533	6432	-95
11	6331	6228	6124	6020	5913	5805	5696	5586	5474	5362	-108
12	5248	5132	5016	4898	4780	4660	4538	4415	4291	4166	-121
13	4040	3912	3784	3654	3523	3391	3257	3122	2986	2850	-135
14	2712	2572	2431	2289	2147	2003	1858	1711	1564	1416	-145
15	1266	1114	962	8089	6555	0499	0343	0185	0026	9865	-156
16	9705	9542	9378	9214	9048	8881	8713	8544	8375	8202	-168
17	8029	7856	7681	7505	7328	7150	6971	6791	6610	6427	-178
18	6244	6058	5873	5688	5498	5309	5119	4927	4735	4541	-190
19	4347	4152	3955	3757	3558	3358	3158	2955	2752	2549	-200
20	2343	2137	1930	1722	1511	1301	1090	0878	0663	0449	-211
21	0233	0016	9799	9580	9359	9139	8917	8694	8470	8245	-221
22	997	8019	7792	7564	7335	7104	6873	6641	6408	6173	-232
23	5762	5466	5227	4988	4747	4506	4264	4021	3777	3531	-242
24	3286	3039	2790	2541	2291	2040	1788	1535	1280	1026	-252
25	0770	0513	0255	9997	9736	9476	9214	8951	8688	8423	-261
26	996	8158	7892	7624	7356	7087	6817	6545	6273	6000	-271
27	5451	5176	4898	4620	4342	4062	3782	3500	3218	2935	-280
28	2652	2366	2080	1793	1505	1217	0928	0637	0346	0053	-289
29	995	9761	9466	9171	8876	8579	8282	7983	7684	7383	-298
30	6780	6478	6174	5869	5564	5258	4956	4642	4334	4024	-307
31	3714	3401	3089	2776	2462	2147	1832	1515	1198	0880	-315
32	0561	0241	9920	9599	9276	8954	8630	8304	7979	7653	-324
33	994	7325	6997	6668	6338	6007	5676	5345	5011	4678	-332
34	4007	3671	3335	2997	2659	2321	1983	1645	1307	9693	-340
35	0610	0267	9922	9578	9230	8883	8534	8186	7837	7486	-347
36	993	7136	6784	6432	6078	5725	5369	5014	4658	4301	-355
37	3585	3226	2866	2505	2144	1782	1419	1055	0691	0326	-362
38	992	9960	9593	9227	8859	8490	8120	7751	7380	7008	-370
39	6263	5890	5516	5140	4765	4389	4011	3634	3255	2876	-377
40	2497	2116	1734	1352	0971	0587	0203	9818	9433	9047	-384
41	991	8661									

\* According to P. Chappuis, Bureau International des Poids et Mesures. Under standard pressure (76 cm. Hg. at every tenth part of a degree from 0° to 41°C., in g./ml. Extracted from Table 287, "Smithsonian Physical Tables," 9th rev. ed., Washington, D.C., 1954. Gildeth, Halvénshus, and Spedding, *J. Chem. Eng. Data*, 17, 402 (1972). critically review this and similar tables and present another tabulation, to 90.9°C. .

Table 3-29. Density and Volume of Water -10° to -250°C.\*

Temp., °C.	Density	Volume	Temp., °C.	Density	Volume	Temp., °C.	Density	Volume
-10	0.99815	0.0186	20	0.99623	0.0177	50	0.98607	0.01207
-9	843	157	21	802	198	51	762	254
-8	869	131	22	780	220	52	715	301
-7	892	108	23	757	244	53	669	349
-6	912	088	24	733	268	54	621	398
-5	99930	0.0070	25	99708	0.0073	55	98573	0.01448
-4	945	055	26	682	320	60	324	705
-3	958	042	27	655	347	65	059	979
-2	970	031	28	627	375	70	97781	0.02270
-1	979	021	29	598	404	75	489	576
0	99987	0.0013	30	99568	0.0034	80	97183	0.02899
1	993	007	31	537	465	85	96865	0.03237
2	997	003	32	506	497	90	534	590
3	999	001	33	473	530	95	192	959
4	0.00000	0.00000	34	440	563	100	98436	0.04343
5	0.99999	0.0001	35	99406	0.00598	110	9510	0.0515
6	997	003	36	371	633	120	9434	0.0601
7	993	007	37	336	669	130	9352	0.0693
8	988	012	38	300	706	140	9264	0.0794
9	981	019	39	263	743	150	9173	0.0902
10	99973	0.0027	40	99225	0.00782	160	9075	0.1019
11	963	037	41	187	821	170	8973	0.1145
12	952	048	42	147	861	180	8866	0.1279
13	940	060	43	107	901	190	8750	0.1429
14	927	073	44	066	943	200	8628	0.1590
15	99913	0.0087	45	99025	0.00985	210	850	0.177
16	897	103	46	9882	0.01028	220	837	0.195
17	880	120	47	940	072	230	823	0.215
18	862	138	48	896	116	240	809	0.236
19	843	157	49	852	162	250	794	0.259

\* The mass of 1 cc. at 4°C. is taken as unity. Extracted from Table 290, "Smithsonian Physical Tables," 9th rev. ed., Washington, D.C., 1954.

† Gases have been listed (in Table 3-31) only for 0°C. and 1 atm. pressure. For all other temperatures use tabulated compressibility and volume data together with  $\rho = MZ/V$  to obtain density data. For liquid air, argon, carbon monoxide, helium, methane, neon, nitrogen, and oxygen see Johnson (ed.), WADD-TR60-56, 1960. Extensive data for cryogenic fluids are given in Gersh, "Low Temperature Cooling," Part II, Moscow, 1949. Data on liquid helium and hydrogen are also given by Scott, "Cryogenic Engineering," Van Nostrand, Princeton, N.J., 1959. For liquid coolants see Weatherford, Tyler, and Ku, WADC-TR-59-395, 1959.

Table 3-176. Heat Capacity of Water\*

[68]

Air-free, at a constant pressure of 1 atm.

Temperature, °C.	Heat capacity, constant pressure, 1 atm., cal./g. °C.†	Temperature, °C.	Heat capacity, constant pressure, 1 atm., cal./g. °C.†	Temperature, °C.	Heat capacity, constant pressure, 1 atm., cal./g. °C.†	Temperature, °C.	Heat capacity, constant pressure, 1 atm., cal./g. °C.†
0	1.00803	25	99892	50	0.99919	75	1.00208
1	1.00717	26	99885	51	99926	76	1.00225
2	1.00636	27	99878	52	99935	77	1.00241
3	1.00564	28	99873	53	99943	78	1.00258
4	1.00495	29	99869	54	99950	79	1.00277
5	1.00433	30	99866	55	99959	80	1.00294
6	1.00378	31	99864	56	99969	81	1.00313
7	1.00328	32	99861	57	99978	82	1.00332
8	1.00277	33	99859	58	99988	83	1.00351
9	1.00234	34	99859	59	99998	84	1.00373
10	1.00194	35	99859	60	1.00007	85	1.00392
11	1.00158	36	99861	61	1.00019	86	1.00414
12	1.00124	37	99861	62	1.00029	87	1.00435
13	1.00093	38	99864	63	1.00041	88	1.00457
14	1.00067	39	99866	64	1.00053	89	1.00480
15	1.00041	40	99869	65	1.00065	90	1.00502
16	1.00019	41	99871	66	1.00079	91	1.00526
17	0.99998	42	99876	67	1.00091	92	1.00550
18	99978	43	99880	68	1.00105	93	1.00574
19	99962	44	99883	69	1.00117	94	1.00600
20	99947	45	99890	70	1.00131	95	1.00626
21	99933	46	99895	71	1.00146	96	1.00653
22	99921	47	99900	72	1.00160	97	1.00684
23	99912	48	99907	73	1.00177	98	1.00705
24	99902	49	99912	74	1.00191	99	1.00734
						100	1.00763

\* From Osborn, Stimson, and Ginnings, *Bur. Standards J. Research*, 28, 197 (1939). See also Benise, *Advan. Wärmesich.*, 8, 222 (1954). Rasmussen and Shindler, *Doklady Akad. Nauk S.S.S.R.*, 120, 771 (1958); Gambill, *Chem. Eng.*, 88, 139 (1959); "Handbook of Chemistry and Physics," 40th ed., Chemical Rubber Publishing Co. (p. 2259, below 0°C.; p. 2263, 100(10)270°C.).

† 1 calorie = 4.1833 NBS int. J. (National Bureau of Standards international joules)

W-2.2 [68]

Table 3-177. Specific Heats of Organic Liquids\*

[68]

From "International Critical Tables," vol. 3, pp. 107-113 and a few data from other sources

Compound	Formula	Temperature, °C.	Sp. ht., cal./g. °C.	Compound	Formula	Temperature, °C.	Sp. ht., cal./g. °C.
Acetal.....	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	0	0.467	Bromochlorobenzene (o-).....	C <sub>6</sub> H <sub>3</sub> BrCl	0	.215
Acetic acid.....	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	19-99	.520	Bromochlorobenzene (m-).....	C <sub>6</sub> H <sub>3</sub> BrCl	0	.212
Acetone.....	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	26-95	.522	Bromiodobenzene (o-).....	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> BrI	0	.153
		3-22.6	.514			5-100	.160
		0	.508			3.2-64.6	.157
		24.2-49.4	.538			1.8-34	.157
Acetonitrile.....	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> N	21-76	.541	(m-).....	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> BrI	0	.152
Acetophenone.....	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O	20-196	.450			5-100	.158
Acetyl chloride.....	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> ClO	0	.359			3.2-64.5	.156
Allyl acetate.....	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	0	.430			1.7-34.1	.154
alcohol.....	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	0	.386			1.7-76.2	.149
		21-96	.665	Bromophenol.....	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> BrO	18-77	.316
benzoate.....	C <sub>9</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	20	.388	Butane (n).....	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0	.549
butyrate.....	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	20	.451	Butyl alcohol (n).....	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> O	21-115	.687
chloride.....	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl	0	.313			30	.582
chloroacetate.....	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> ClO <sub>2</sub>	20	.396			-76.2	.443
dichloroacetate.....	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	20	.332			-33.3	.453
isobutyrate.....	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	20	.448	chloride (n).....	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl	20	.451
propionate.....	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	20	.451	formate (n).....	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	20	.459
trichloroacetate.....	C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	20	.288	propionate.....	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	20	.459
valerate.....	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	20	.451	valerate.....	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	20	.459
Aminobenzoic acid (o-).....	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	M. P.	.435	Butyric acid (n).....	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	0	.444
(m-).....	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	M. P.	.435			40	.501
(p-).....	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	M. P.	.444			20-100	.515
Amyl alcohol (d-primary).....	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O	22-125	.711	Butyronitrile (n).....	C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> N	21-113	.547
(t-).....	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O	20-99	.753				
Amylene.....	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	0	.282	Caproic acid.....	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	29-105	.531
Acetone.....	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	23-233	.511	Capronitrile.....	C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> N	18-156	.541
		22	.531	Carbon tetrachloride*.....	CCl <sub>4</sub>	0	.198
		24	.564			30	.201
		25	.612			30	.200
		8-82	.512	Carvacrol.....	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	24-233	.575
Aniline.....	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	22-172	.425	Chloral.....	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> ClO	17-53	.250
Benzaldehyde.....	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	6-60	.419	hydrate.....	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	55-88	.470
Benzene*.....	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	10	.340	Chlorobenzene*.....	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl	0	.273
		65	.457			10	.298
Benzonitrile.....	C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N	22-186	.471	Chlorobenzoic acid (o-).....	C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> ClO <sub>2</sub>	0	0.390
Benzophenone (β).....	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub> O	3-40	.382	(m-).....	C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> ClO <sub>2</sub>	0	.265
		0	.346	(p-).....	C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> ClO <sub>2</sub>	M. P.	.545
Benzyl alcohol.....	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	20-100	.511	Chloroform*.....	CHCl <sub>3</sub>	0	.232
chloride.....	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl	0	.323			15	.226
ethylene.....	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0	.393	Chlorophenol.....	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> ClO	0-20	.399
Bromobenzene.....	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Br	0	.215	Chlorotoluene.....	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> Cl	0	.315
		20-100	.251				
		16.9-63	.239				

\* See line coordinate chart, Fig. 3-11, p. 3-129, for the specific heats of a number of substances as a function of the temperature. For additional data on the specific heat of liquid organic compounds see pp. 2275-2282 of "Handbook of Chemistry and Physics," 40th ed., Chemical Rubber Publishing Co. Extensive data on ethylene glycol, diethylene glycol, triethylene glycol, and propylene glycol solutions are contained in Union Carbide Corp. publication F4763F, 1958.

Table 3-783. Viscosities of Liquids

[ 68 ]

Coordinates for Fig. 3-45

Liquid	X	Y	Liquid	X	Y
Acetaldehyde	15.2	4.8	Freon-113	12.5	11.4
Acetic acid, 100%	12.1	14.2	Glycerol, 100%	2.0	30.0
Acetic acid, 70%	9.5	17.0	Glycerol, 50%	6.9	19.6
Acetic anhydride	12.7	12.8	Heptane	14.1	8.4
Acetone, 100%	14.5	7.2	Hexane	14.7	7.0
Acetone, 35%	7.9	15.0	Hydrochloric acid, 31.5%	13.0	16.6
Acetonitrile	14.4	7.4	Iodobenzene	12.8	15.9
Acrylic acid	12.3	13.9	Isobutyl alcohol	7.1	18.0
Allyl alcohol	10.2	14.3	Isobutyric acid	12.2	14.4
Allyl bromide	14.4	9.6	Isopropyl alcohol	8.2	16.0
Allyl iodide	14.0	11.7	Isopropyl bromide	14.1	9.2
Ammonia, 100%	12.6	2.0	Isopropyl chloride	13.9	7.1
Ammonia, 26%	10.1	13.9	Isopropyl iodide	13.7	11.2
Amyl acetate	11.8	12.5	Kerosene	10.2	16.9
Amyl alcohol	7.5	18.4	Linseed oil, raw	7.5	27.2
Aniline	8.1	18.7	Mercury	18.4	16.4
Anisole	12.3	13.5	Methanol, 100%	12.4	10.5
Arsenic trichloride	13.9	14.5	Methanol, 90%	12.3	11.8
Benzene	12.5	10.9	Methanol, 40%	7.8	15.5
Brine, CaCl <sub>2</sub> , 25%	6.6	15.9	Methyl acetate	14.2	8.2
Brine, NaCl, 25%	10.2	16.6	Methyl acrylate	13.0	9.5
Bromine	14.2	13.2	Methyl n-butylate	12.3	9.7
Bromotoluene	20.0	15.9	Methyl n-butylate	13.2	10.3
Butyl acetate	12.3	11.0	Methyl chloride	15.0	3.8
Butyl acrylate	11.5	12.6	Methyl ethyl ketone	13.9	8.6
Butyl alcohol	8.6	17.2	Methyl formate	14.2	7.5
Butyric acid	12.1	15.3	Methyl iodide	14.3	9.3
Carbon dioxide	11.6	0.3	Methyl propionate	13.5	9.5
Carbon disulfide	16.1	7.5	Methyl propyl ketone	14.3	9.5
Carbon tetrachloride	12.7	13.1	Methyl sulfide	15.3	6.4
Chlorobenzene	12.3	12.4	Napthalene	7.9	18.1
Chloroform	14.4	10.2	Nitric acid, 95%	12.8	13.8
Chlorosulfonic acid	11.2	18.1	Nitric acid, 60%	10.8	17.0
Chlorotoluene, ortho	13.0	13.3	Nitrobenzene	12.9	16.2
Chlorotoluene, meta	13.3	12.5	Nitrogen dioxide	11.0	17.0
Chlorotoluene, para	13.3	12.5	Nitrotoluene	13.7	10.0
Cresol, meta	2.5	20.8	Octane	6.6	21.1
Cyclohexanol	2.9	24.3	Oetyl alcohol	10.9	17.3
Cyclohexane	9.8	12.9	Pentachloroethane	14.9	5.2
Dibromomethane	12.7	15.8	Pentane	6.9	20.8
Dichloroethane	13.2	12.2	Phenol	13.8	16.7
Dichloromethane	14.6	8.9	Phosphorus tribromide	16.2	10.9
Diethyl ketone	13.5	9.2	Phosphorus trichloride	12.8	13.8
Diethyl oxalate	11.0	16.4	Propionic acid	13.1	10.3
Diethylene glycol	5.0	24.7	Propyl acetate	9.1	16.5
Diphenyl	12.0	18.3	Propyl alcohol	14.5	9.6
Dipropyl ether	13.2	8.6	Propyl bromide	14.4	7.5
Dipropyl oxalate	10.3	17.7	Propyl chloride	13.1	9.7
Ethyl acetate	13.7	9.1	Propyl formate	14.1	11.6
Ethyl acrylate	12.7	10.4	Propyl iodide	16.4	13.9
Ethyl alcohol, 100%	10.5	13.8	Sodium	3.2	25.8
Ethyl alcohol, 95%	9.8	14.3	Stannic chloride	13.5	12.8
Ethyl alcohol, 40%	6.5	16.6	Succinonitrile	10.1	20.8
Ethyl benzene	13.2	11.5	Sulfur dioxide	15.2	7.1
Ethyl bromide	14.5	8.1	Sulfuric acid, 110%	7.2	27.4
2-Ethyl butyl acrylate	11.2	14.0	Sulfuric acid, 108%	8.0	25.1
Ethyl chloride	14.8	6.0	Sulfuric acid, 98%	7.0	24.8
Ethyl ether	14.5	5.3	Sulfuric acid, 60%	10.2	21.3
Ethyl formate	14.2	8.4	Sulfuryl chloride	15.2	12.4
2-Ethyl hexyl acrylate	9.0	15.0	Tetrachloroethane	11.9	15.7
Ethyl iodide	14.7	10.3	Thiophene	13.2	11.0
Ethyl propionate	13.2	9.9	Titanium tetrachloride	14.4	12.3
Ethyl propyl ether	14.0	7.0	Toluene	13.7	10.4
Ethyl sulfide	13.8	8.9	Trichloroethylene	14.8	10.5
Ethylene bromide	11.9	15.7	Triethylene glycol	4.7	24.8
Ethylene chloride	12.7	12.2	Turpentine	11.5	14.9
Ethylene glycol	6.0	23.6	Vinyl acetate	14.0	8.8
Ethylidene chloride	14.1	6.7	Vinyl toluene	13.4	12.0
Fluorobenzene	13.7	10.4	Water	10.2	13.0
Formic acid	10.7	15.8	Xylene, ortho	13.5	12.1
Freon-11	14.4	9.0	Xylene, meta	13.9	10.6
Freon-12	16.8	15.6	Xylene, para	13.9	10.9
Freon-21	15.7	7.5			
Freon-22	17.2	4.7			

Values of Seiner, *Chem. Eng.* September, 1958, have been included in this listing. For newer measurements of the viscosity of water see Moszynski, *J. Heat Transfer*, 83C, 111 (1961). The Engineering Sciences Data Unit (London) are producing extensive tables. Item 68009, 1968, covers water, steam, heavy water, item 71003, 1971, liquid petroleum products, etc. The Landolt-Bornstein vol. 5a, 1969, probably represents the most extensive collection presently available for the liquid and vapor (or gas) phases.

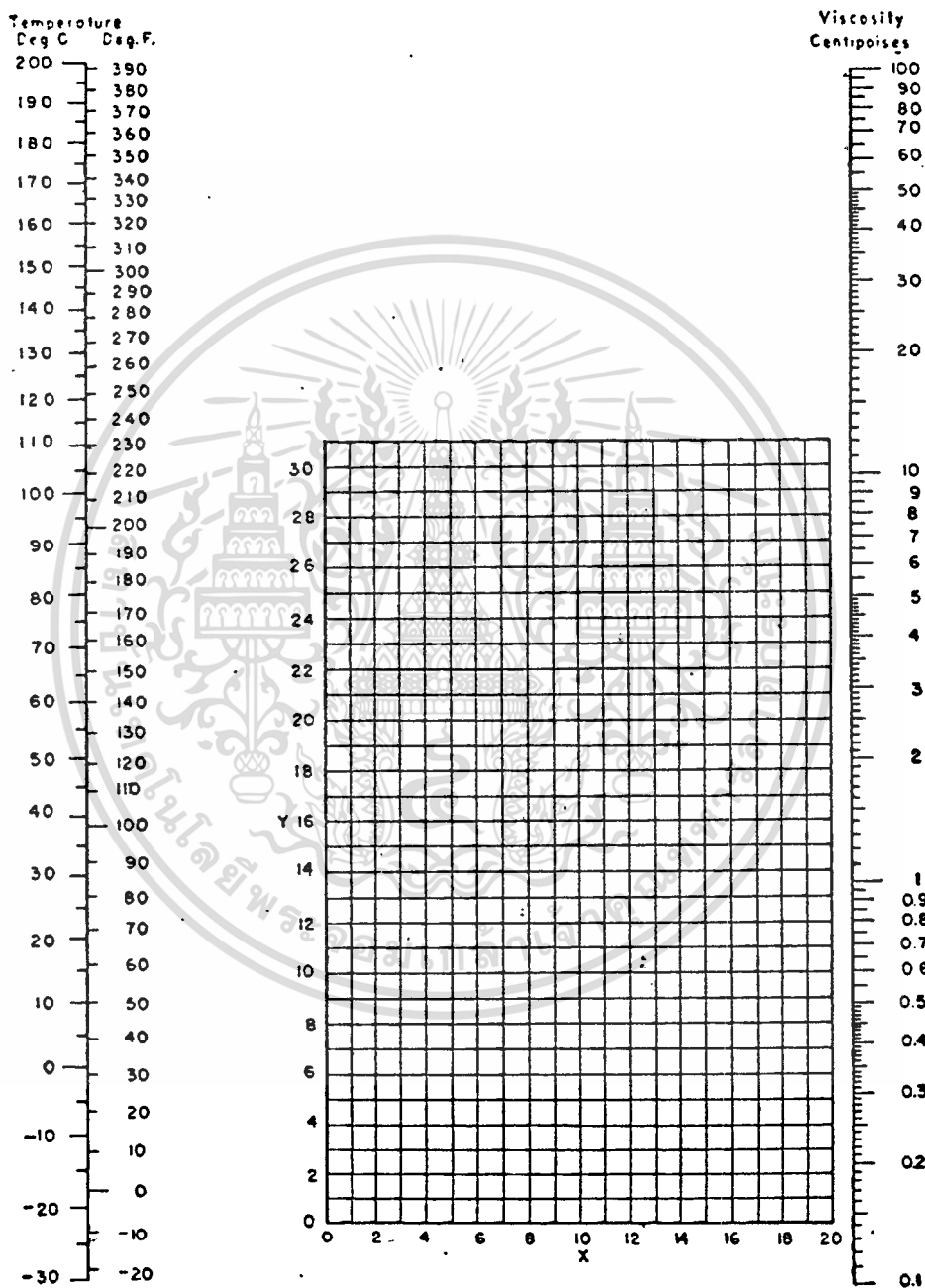


Fig. 3-45. Viscosities of liquids at 1 atm -For coordinates, see Table 3-283. [ 68 ]

Table 3-284. Thermal Conductivity of Liquids [68]

$$k = B.t^n / h^m \text{ sq. ft.}^2 \text{ } ^\circ\text{F.} / \text{ft.}^2$$

A linear variation with temperature may be assumed. The extreme values given constitute also the temperature limits over which the data are recommended.

Liquid	t, °F.	k	Liquid	t, °F.	k
Acetic acid 100% <sup>1</sup>	68	0.099	Hexane (n-) <sup>12</sup>	86	0.080
50% <sup>1</sup>	68	.20	140	0.078	
Acetone <sup>1</sup>	86	.102	86	.094	
	167	.095	167	.091	
Allyl alcohol <sup>11</sup>	77-86	.104	86	.093	
Ammonia <sup>1</sup>	5-86	.29	167	.090	
Ammonia, aqueous 26% <sup>1</sup>	68	.261			
	140	.29	Kerosene <sup>1</sup>	68	.086
Amyl acetate <sup>7</sup>	50	.083	167	.081	
alcohol (n-) <sup>13</sup>	86	.094			
(iso-) <sup>13</sup>	212	.089	Mercury <sup>1</sup>	82	4.83
Aniline <sup>6</sup>	86	.088	68	0.124	
	167	.057	Methyl alcohol 100% <sup>1</sup>	68	.154
	32-68	100	80%	68	.190
Benzene <sup>13</sup>	86	.092	60%	68	.234
	140	.087	40%	68	.284
Bromobenzene <sup>13</sup>	86	.074	20%	68	.311
	212	.070	100%	122	.114
Butyl acetate (n-) <sup>13</sup>	77-86	.085	chloride <sup>13</sup>	5	.111
alcohol (n-) <sup>13</sup>	86	.097	86	.089	
(iso-) <sup>13</sup>	50	.091	Nitrobenzene <sup>13</sup>	86	.095
Calcium chloride brine 30% <sup>1</sup>	86	.32	212	.056	
15% <sup>1</sup>	86	.34	86	.125	
Carbon disulfide <sup>1</sup>	86	.073	140	.120	
tetrachloride <sup>13</sup>	167	.088	86	.084	
	32	.107	140	.082	
Chlorobenzene <sup>13</sup>	154	.094	Octane (n-) <sup>13</sup>	86	.083
Chloroform <sup>13</sup>	50	.063	140	.081	
Cymene (para-) <sup>13</sup>	86	.080	86	.079	
	140	.078	Oils, castor <sup>1</sup>	68	.104
		.079	212	.100	
			68	.097	
			212	.095	
Dessane (n-) <sup>13</sup>	86	.065	Paraldehyde <sup>13</sup>	86	.084
	140	.063	212	.078	
Dichlorodifluoromethane <sup>13</sup>	20	.057	86	.078	
	60	.053	167	.074	
	100	.048	122	.092	
	140	.043	Perchloroethylene <sup>13</sup>	86	.075
	180	.038	Petroleum ether <sup>1</sup>	167	.073
Dichloroethane <sup>13</sup>	122	.082	86	.099	
Dichloromethane <sup>13</sup>	5	.111	167	.095	
	86	.096	86	.091	
			140	.090	
Ethyl acetate <sup>7</sup>	68	.101	Sodium	212	.49
alcohol 100% <sup>1</sup>	68	.105	410	.46	
80%	68	.137	86	0.33	
60%	68	.176	86	.34	
40%	68	.224	86	.21	
20%	68	.281	86	.25	
100% <sup>1</sup>	122	.087	86	.30	
benzene <sup>13</sup>	86	.086	5	.128	
	140	.082	86	.111	
bromide <sup>1</sup>	68	.070			
ether <sup>1</sup>	86	.080	Toluene <sup>13</sup>	86	.086
	167	.078	167	.084	
	104	.064	122	.077	
iodide <sup>11</sup>	167	.063	122	.080	
	167	.063	59	.074	
Ethylene glycol <sup>7</sup>	32	.153	Turpentine <sup>1</sup>		
			Vaseline <sup>7</sup>	59	.106
Gasoline <sup>13</sup>	86	.078	Water <sup>13</sup>	32	3.43
Glycerol 100% <sup>1</sup>	68	.164	100	3.63	
80%	68	.189	200	3.93	
60%	68	.220	300	3.95	
40%	68	.259	420	3.76	
20%	68	.278	620	.275	
100% <sup>1</sup>	212	.164			
Heptane (n-) <sup>13</sup>	86	.081	Xylene (ortho-) <sup>7</sup>	68	.090
	140	.079	(meta-) <sup>7</sup>	68	.090

\* Thermal conductivity data for a number of oils are available from Reference 12. For many oils an average value of 0.079 may be used.

<sup>1</sup> Bates, *Ind. Eng. Chem.*, 28, 494 (1936).

<sup>2</sup> Bates, Hazzard, and Palmer, *Ind. Eng. Chem.*, 10, 314 (1938).

<sup>3</sup> Benning, A. F., private communication, 1940.

<sup>4</sup> Bridgman, *Proc. Am. Acad. Arts Sci.*, 59, 141 (1923).

<sup>5</sup> Chilton and Genereaux, personal communication, 1939, based on data selected from the literature.

<sup>6</sup> Daniloff, *J. Am. Chem. Soc.*, 54, 1328 (1932).

<sup>7</sup> "International Critical Tables," McGraw-Hill, New York, 1929.

<sup>8</sup> Kardos, *Z. Ver. deut. Ing.*, 77, 1158 (1933); *Z. ges. Kälte-Ind.*, 41, 1, 29 (1934).

<sup>9</sup> Kaye and Higgins, *Proc. Roy. Soc. (London)*, A117, 459 (1928).

<sup>10</sup> DuPont Chlorinated Hydrocarbons, *Tech. Bull.*, Electrochemicals Dept., du Pont, Buffalo, N. Y., 1938.

<sup>11</sup> Shiba, *Sci. Papers Inst. Phys. Chem. Research Tokyo*, 16, 205 (1931).

<sup>12</sup> Smith, *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs.*, 58, 719 (1936).

<sup>13</sup> Timrot and Vargaftik, *J. Tech. Phys. (U.S.S.R.)*, 10, 1063 (1940).

SpecificationsHigh Speed Diesel

	Specification	Test Method
1. Specific Gravity @ 15.6/15.6 C (60/60 F)	0.82 min. 0.90 max.	ASTM-D-1298
2. Calculated Cetane Index. or Cetane Number	50 min. 50 min.	ASTM-D-976 ASTM-D-613
3. Kinematic Viscosity @ 40 C (104 F), cSt. or Saybolt Universal Viscosity @ 100 F, SUS	1.8 - 5.0 32 - 43	ASTM-D-445 ASTM-D-88
4. Pour Point, C ( F)	10 (50) max.	ASTM-D-97
5. Sulphur Content, % wt.	1.0 max.	ASTM-D-129 or Equivalent
6. Copper Strip Corrosion @ 50 C (122 F), 3 hrs. No. 1	max.	ASTM-D-130
7. Conradson Carbon Residue, % wt.	0.05 max.	ASTM-D-189
8. Water & Sediment, % vol	0.05 max.	ASTM-D-2709
9. Ash, % wt	0.01 max.	ASTM-D-482
10. Flash Point, (P.M.), C ( F)	52 (125) min.	ASTM-D-93
11. Distillation :		ASTM-D-86
90 % evaporation, C ( F)	370 (698) max.	
12. Colour, ASTM	2.5 max	ASTM-D-1500

Dr. M. S. J. S. S.

w-2.4SpecificationsLow Speed Diesel

	Specification	Test Method
1. Specific Gravity @ 15.6/15.6 °C (60/60 °F)	0.920 max.	ASTM-D-1298
2. Calculated Cetane Index	45 min.	ASTM-D-976
or Cetane Number	45 min.	ASTM-D-613
3. Kinematic Viscosity @ 40 °C (104 °F), cSt	8.0 max.	ASTM-D-445
or @ 50 °C (122 °F), cSt	6.0 max.	
or Saybolt Universal Viscosity @ 100 °F, SUS	54 max.	ASTM-D-88
or @ 122 °F, SUS	46 max.	
4. Pour Point, °C (°F)	16 (60) max.	ASTM-E-97
5. Sulphur Content, % wt	1.5 max.	ASTM-D-129 or Equivalent
6. Water & Sediment, % vol	0.3 max.	ASTM-D-2709
7. Ash, % wt	0.02 max.	ASTM-D-432
8. Flash Point, (P.M.) °C, (°F)	52 (125) min.	ASTM-D-93
9. Colour, ASTM	4.0 max.	ASTM-D-1500

1  
 กรมควบคุมมลพิษ  
 รักษานโยบาย

# บริษัท เชลล์แห่งประเทศไทย จำกัด The Shell Company of Thailand Limited



140 Wireless Road,  
Bangkok  
P.O. Box 345  
Telephone 2518291  
Telegram Shell Bangkok  
Telex 3240 Shell TH

140 ถนนวิสุทธิ  
กรุงเทพมหานคร  
ตู้ ป.ณ. 345  
โทร. 2518291  
โทรเลข: เชลล์

Your ref.

Our ref.

- 56 -

Date:

## TYPICAL TEST FIGURES SHELL TALPA OIL

	20	30	40
Specific Gravity at 30 °C	0.894	0.898	0.895
Flash Point, COC °C	229	229	246
Fire Point, °C	243	252	269
Pour Point, °C	-30	-24	-21
Viscosity, Kinematic at 100 °C, cSt	8.80	10.7	14.4

High quality straight mineral oils suitable for crankcase lubrication of cross-head diesel engines and lowly rated trunk piston diesel engines. Also recommended for general lubrication of bearings and gears and compressors of reciprocating type.

For: THE SHELL COMPANY OF THAILAND LIMITED

.....  
On behalf of Sales Technical Manager

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บริษัท เชลล์แห่งประเทศไทย จำกัด The Shell Company of Thailand Limited



140 Wireless Road,  
Bangkok  
P.O. Box 345  
Telephone 2518291  
Telegram Shell Bangkok.  
Telex 3240 Shell TH

140 ถนนวิภาวดี  
กรุงเทพมหานคร  
ตู้ ป.ณ. 345  
โทร. 2518291  
โทรเลข: เชลล์

Your ref.

Our ref.

- 71 -

Date:

## TYPICAL TEST FIGURES

### SHELL VITREA OIL

	150	220	320
Specific Gravity at 30°C	0.882	0.885	0.890
Flash Point, COC °C	277	280	305
Fire Point, °C	303	311	330
Pour Point, °C	-9	-9	-9
Viscosity, Kinematic at 40°C, cSt	150	220	320
Viscosity Index	99	98	97

High quality straight mineral oils, covering a wide range of viscosities. Suitable for lubrication in circulating and other enclosed systems e.g. bearings and gears of general machinery.

For: THE SHELL COMPANY OF THAILAND LIMITED

.....  
On behalf of Sales Technical Manager

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ.....  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

492 Chapter 13—Radiation Transducers

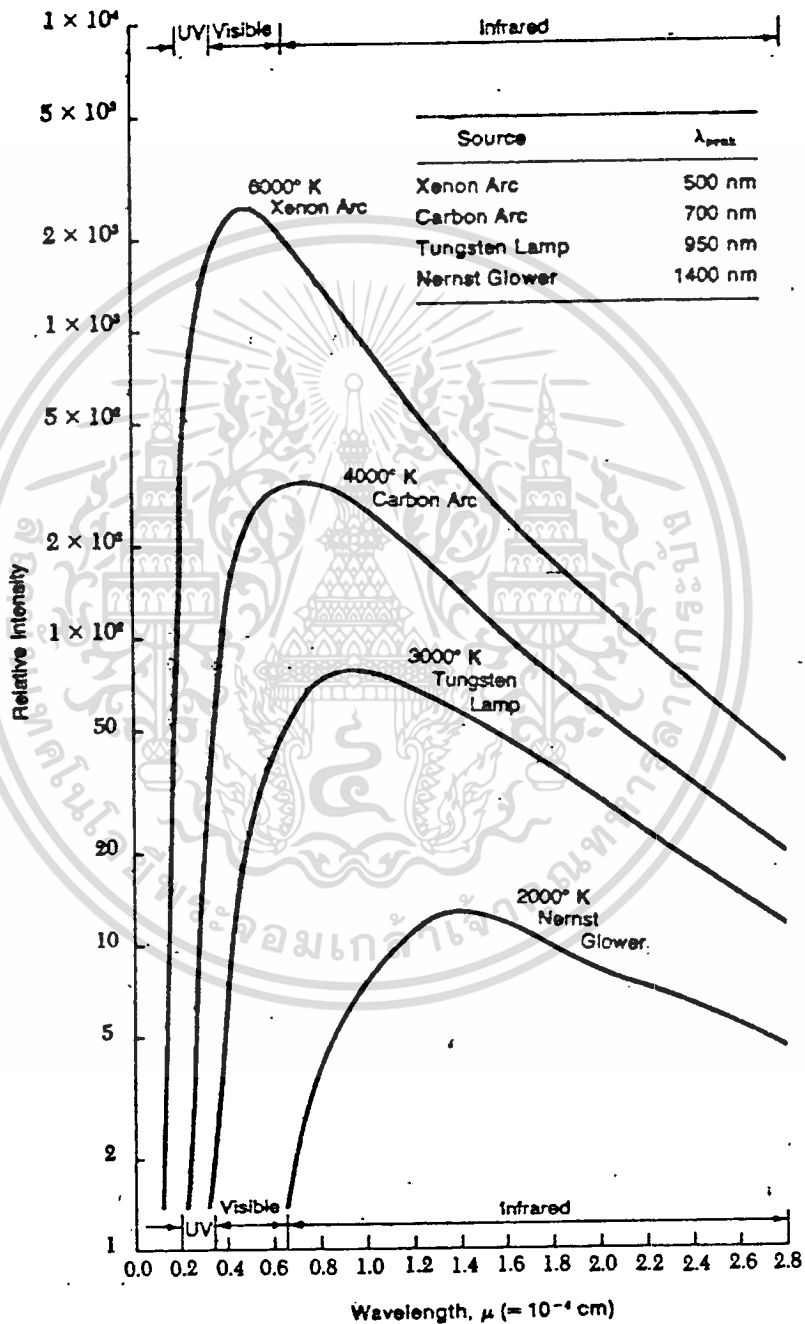


Figure 13.1 Emission curves for several typical blackbody radiators. Note the low wavelength cutoffs which fix the applicable wavelength regions of use.

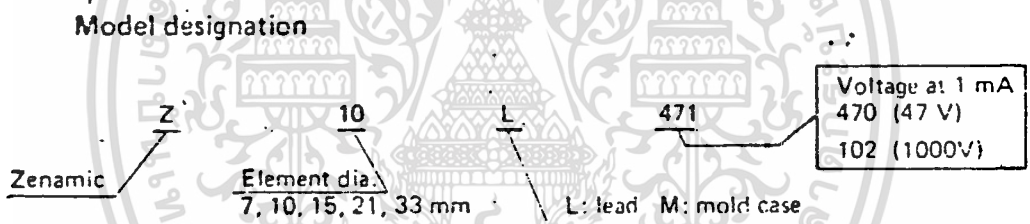
Zenamic, which means ceramic with Zener characteristics, is a metal oxide varistor which is primarily used for surge absorption.

**Characteristics**

- ★ Great endurance against surge voltages
- ★ Excellent voltage control characteristics.
- ★ No follow-on current.
- ★ Symmetrical voltage-current characteristics.

**Applications**

- ★ Lightning surge absorption.
- ★ Switching surge absorption.
- ★ Semiconductor protection.
- ★ Quenching contact sparks.

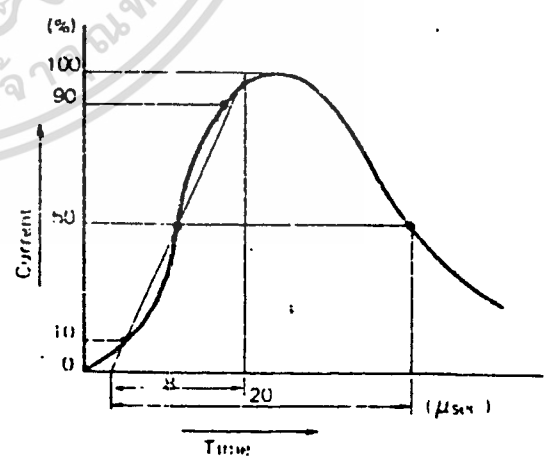


8 x 20 μsec impulse current waveforms

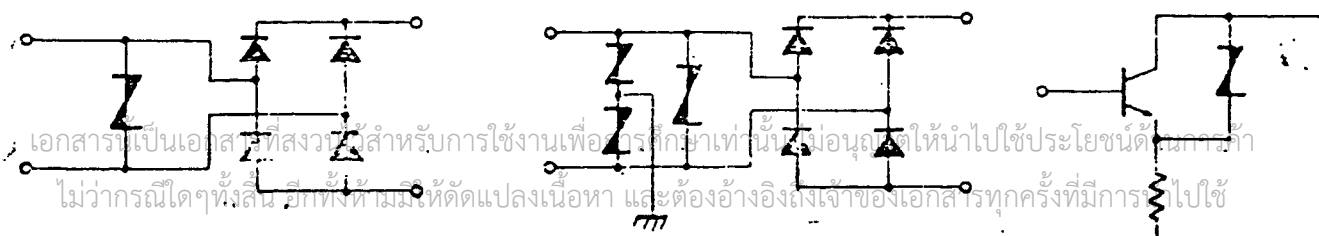
**Lightning Surge Waveforms**

Current waveforms for lightning surges vary and they cannot be expressed by a certain waveform. JEC stipulates 8 x 20 μsec. and 4 x 10 μsec. as standard waveforms.

Zenamic's withstanding endurance is determined by a standard impulse current of 8 x 20 μsec., therefore, selection should be made based on the values given in the catalog.



**Application examples**



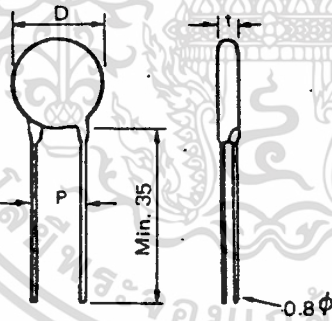
Type No	Measured value ①		Surge ② current capacity 8 x 20 μsec.	Surge energy capacity sinusoidal half wave ③	Voltage clamping ratio E <sub>XA</sub> /E <sub>1</sub> ④	Applied voltage		Capacity reference value
	E <sub>1</sub>	E <sub>1</sub> /E <sub>0.1</sub>				AC r.m.s. value	Smooth DC	
<b>L Type</b>					X = 10 A 2.2±20%			
Z7L220	19 ~ 25V	1.25	100A	1.0J		12V	15V	4200pF
Z7L270	23 ~ 31	..	..	..		14	19	3300
Z7L330	28 ~ 38	..	..	..		17	23	2700
Z7L390	33 ~ 45	..	..	2.0		20	27	2200
Z7L470	39 ~ 54	..	..	1.0	1.8	25	33	1400
Z7L560	47 ~ 64	..	..	..	..	30	40	1100
Z7L680	57 ~ 78	..	..	..	..	36	48	870
Z7L820	69 ~ 94	..	..	2.0	..	44	58	700
Z7L101	85 ~ 115	..	..	..	..	54	72	520
Z7L121	102 ~ 138	..	..	..	..	65	86	420
Z7L151	135 ~ 165	1.1	250	1.0	X = 100 A 2.0±20%	90	120	410
Z7L181	162 ~ 198	..	..	2.0	..	110	140	350
Z7L201	180 ~ 220	..	..	..	1.83	120	160	320
Z7L221	198 ~ 242	..	..	..	..	130	170	300
Z7L271	243 ~ 297	..	..	..	..	160	210	250
Z7L331	297 ~ 363	..	..	..	..	200	260	210
Z7L391	351 ~ 429	..	..	4.0	..	230	310	180
✓ Z7L441	396 ~ 484	..	..	..	..	260	350	160
✓ Z7L471	423 ~ 517	..	..	..	..	280	380	150
Z7L561	504 ~ 616	..	..	..	..	340	450	140
Z7L681	612 ~ 748	..	..	..	..	410	550	110
Z7L821	738 ~ 902	..	..	8.0	1.75	490	660	96
Z7L102	900 ~ 1100	..	..	..	..	600	810	86
Z10L330	28 ~ 38	1.25	250	6.0	X = 10 A 2.2±20%	17	23	4600
Z10L390	33 ~ 45	..	..	8.0	..	20	27	3800
Z10L470	39 ~ 54	..	..	6.0	1.8	25	33	2400
Z10L560	47 ~ 64	..	..	..	..	30	40	1900
Z10L680	57 ~ 78	..	..	..	..	36	48	1500
Z10L820	69 ~ 94	..	..	8.0	..	44	58	1200
Z10L101	85 ~ 115	..	..	..	..	54	72	900
Z10L121	102 ~ 138	..	..	..	..	65	86	720
Z10L151	135 ~ 165	1.1	500	6.0	X = 100 A 1.83±20%	90	120	700
Z10L181	162 ~ 198	..	..	8.0	..	110	140	600
Z10L201	180 ~ 220	..	..	..	1.75	120	160	550
Z10L221	198 ~ 242	..	..	10	..	130	170	520
Z10L271	243 ~ 297	..	..	..	..	160	210	440
Z10L331	297 ~ 363	..	..	12	..	200	260	370
Z10L391	351 ~ 429	..	..	15	..	230	310	330
Z10L441	396 ~ 484	..	..	..	..	260	350	310
✓ Z10L471	423 ~ 517	..	..	..	..	280	380	280
Z10L561	504 ~ 616	..	..	..	..	340	450	250
Z10L681	612 ~ 748	..	..	..	..	410	550	220
Z10L821	738 ~ 902	..	..	20	1.67	490	660	190
Z10L102	900 ~ 1100	..	..	..	..	600	810	170
Z15L390	33 ~ 45	1.25	500	10	X = 10 A 2.2±20%	20	27	8000
Z15L470	39 ~ 54	..	..	8	1.8	25	33	5000
Z15L560	47 ~ 64	..	..	..	..	30	40	4000
Z15L680	57 ~ 78	..	..	..	..	36	48	3100
Z15L820	69 ~ 94	..	..	10	..	44	58	2500
Z15L101	85 ~ 115	..	..	..	..	54	72	1900
Z15L121	102 ~ 138	..	..	12	..	65	86	1500
Z15L151	135 ~ 165	1.1	1000	10	X = 100 A 1.83±20%	90	120	1600
Z15L181	162 ~ 198	..	..	12	1.75	110	140	1400
Z15L201	180 ~ 220	..	..	..	1.67	120	160	1200
Z15L221	198 ~ 242	..	..	15	..	130	170	1100
Z15L271	243 ~ 297	..	..	..	..	160	210	970
Z15L331	297 ~ 363	..	..	17	..	200	260	820
Z15L391	351 ~ 429	..	..	20	..	230	310	700
Z15L441	396 ~ 484	..	..	..	..	260	350	640
✓ Z15L471	423 ~ 517	..	..	..	..	280	380	600
Z15L561	504 ~ 616	..	..	25	..	340	450	520
Z15L681	612 ~ 748	..	..	..	..	410	550	440
Z15L821	738 ~ 902	..	..	30	1.58	490	660	380
Z15L102	900 ~ 1100	..	..	..	..	600	810	330
Z21L470	39 ~ 54	1.25	1000	11	X = 10 A 1.8±20%	25	33	7800
Z21L560	47 ~ 64	..	..	13	..	30	40	6200
Z21L680	57 ~ 78	..	..	..	..	36	48	5000
Z21L820	69 ~ 94	..	..	15	..	44	58	4000
Z21L101	85 ~ 115	..	..	..	..	54	72	3000
Z21L121	102 ~ 138	..	..	..	..	65	86	2300

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
 ใบนี้จัดทำขึ้นโดยทางเรามีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Type No.	Measured value ①		Surge current capacity ② 8 x 20 μsec.	Surge energy capacity sinusoidal half wave ③	Voltage champing ratio ④ E <sub>XA</sub> /E <sub>1</sub>	Applied voltage		Capacity reference value
	E <sub>1</sub>	E <sub>1</sub> /E <sub>0.1</sub>				AC r.m.s. value	Smooth DC	
Z21L151	135 ~ 165	1.25	2000A	15J	X=100A	90	120	2300
Z21L181	162 ~ 198	:	:	18	1.67 ± 20 %	110	140	2000
Z21L201	180 ~ 220	:	:	:	1.58	120	160	1800
Z21L221	198 ~ 242	:	:	22	:	130	170	1700
Z21L271	243 ~ 297	:	:	:	:	160	210	1400
Z21L331	297 ~ 363	:	:	25	:	200	260	1200
Z21L391	351 ~ 429	:	:	30	:	230	310	1050
Z21L441	396 ~ 484	:	:	:	:	260	350	950
Z21L471	423 ~ 517	:	:	:	:	280	380	900
Z21L561	504 ~ 616	:	:	35	:	340	450	800
Z21L681	612 ~ 748	:	:	:	:	410	550	680
Z21L821	738 ~ 902	:	:	40	1.50	490	660	580
Z21L102	900 ~ 1100	:	:	:	:	600	810	500
<b>M Type</b>					X=100A			
Z33M221	198 ~ 242	1.1	10000A	50J	1.58 ± 20 %	130V	170V	5000pF
Z33M271	243 ~ 297	:	:	:	:	160	210	4000
Z33M331	297 ~ 363	:	:	60	:	200	260	3200
Z33M391	351 ~ 429	:	:	75	:	230	310	2700
Z33M441	396 ~ 484	:	:	:	:	260	350	2400
Z33M471	423 ~ 517	:	:	:	:	280	380	2200
Z33M561	504 ~ 616	:	:	85	:	340	450	1800
Z33M681	612 ~ 748	:	:	:	:	410	550	1500
Z33M821	738 ~ 902	:	:	100	1.50	490	660	1200
Z33M102	900 ~ 1100	:	:	:	:	600	810	1000

- ① E<sub>1</sub> and E<sub>0.1</sub> express Zenamic voltages for currents of 1 mA and 0.1 mA DC, respectively.
- ② When the rated surge current is applied twice at a 2 minute interval, the change rate of E<sub>1</sub> is within ± 10%.
- ③ When the rated energy is applied 1,000 times, the change rate of E<sub>1</sub> is within ± 10%.
- ④ E<sub>XA</sub> express the Zenamic voltage when a current of XA is introduced with a waveform of 8 x 20 μsec.

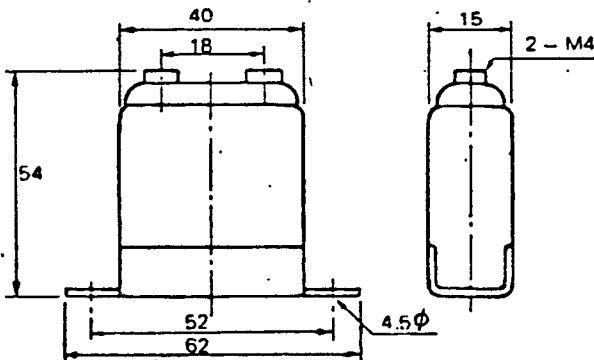
Outer dimensions of L type



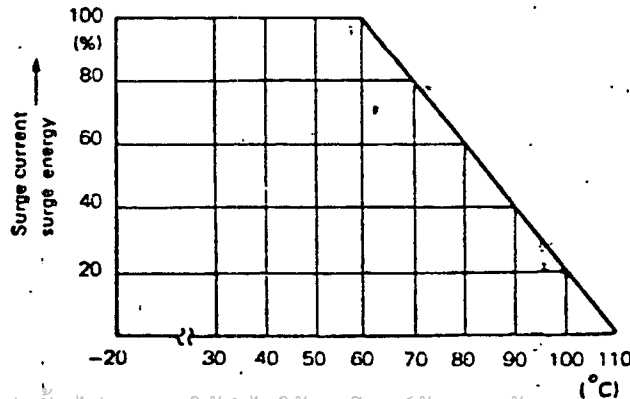
	Z7L	Z10L	Z15L	Z21L
D	max. 10	max. 13	max. 18	max. 24
t	max. 8	max. 8	max. 8	max. 9
P	6.8	8.3	8.3	10.8

Insulation withstanding voltage: AC 1500 V, a minute  
Lead wire extension: 2 kg or more

Outer dimensions of M type

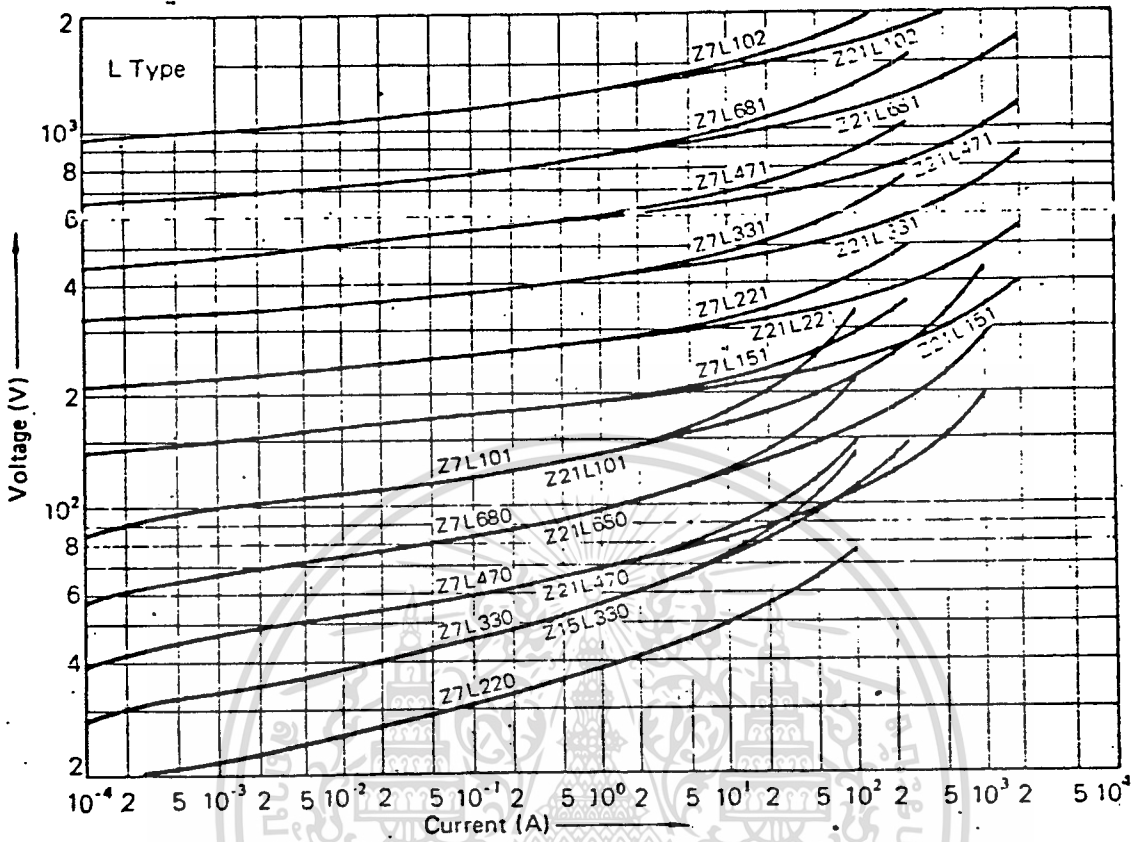


Power derating curve



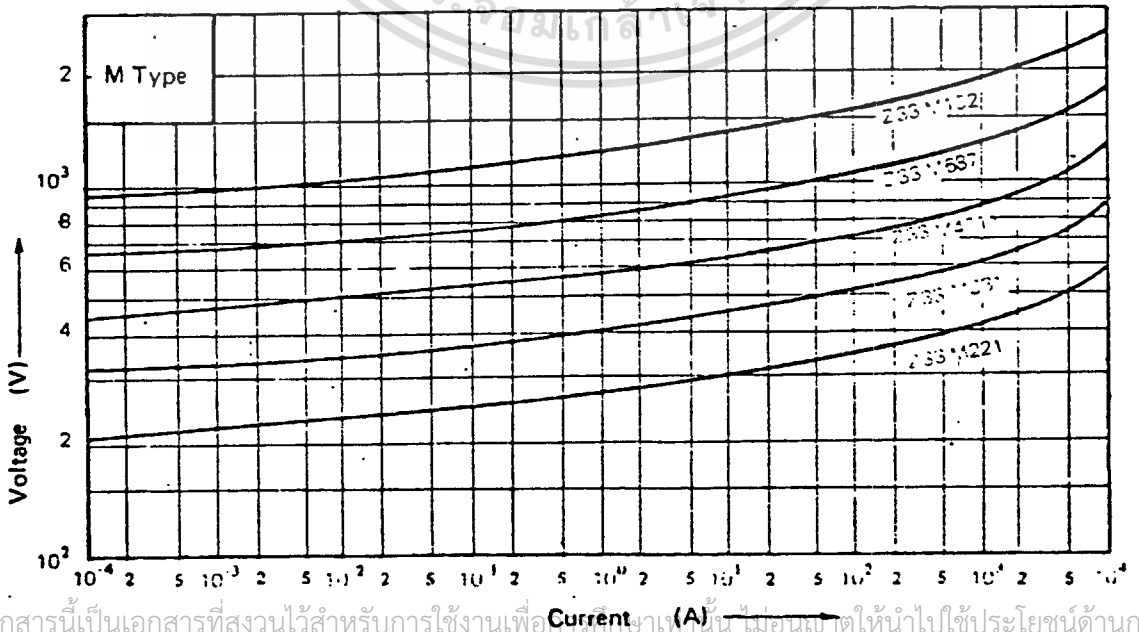
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ Ambient temperature ด้านบนค่า

Voltage vs. current characteristics of Zenamic (L type)

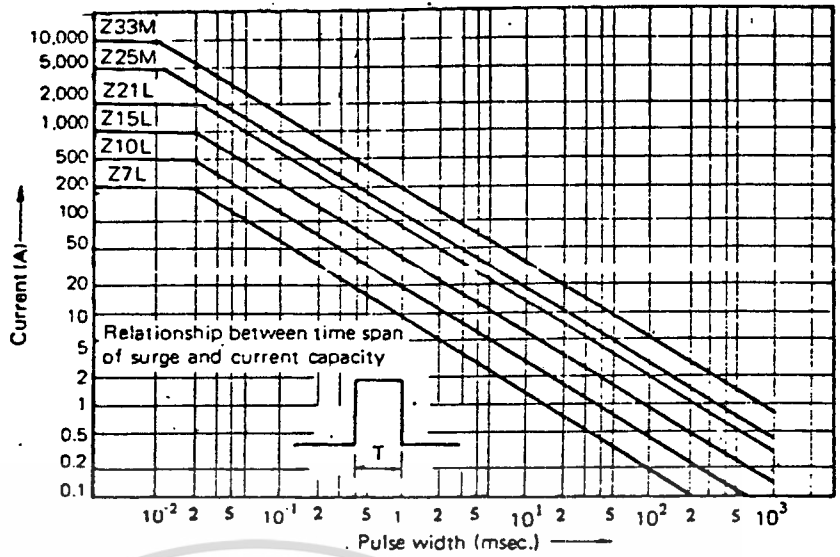


• The characteristics for Z10L and Z15L are median values for Z7L and Z21L.

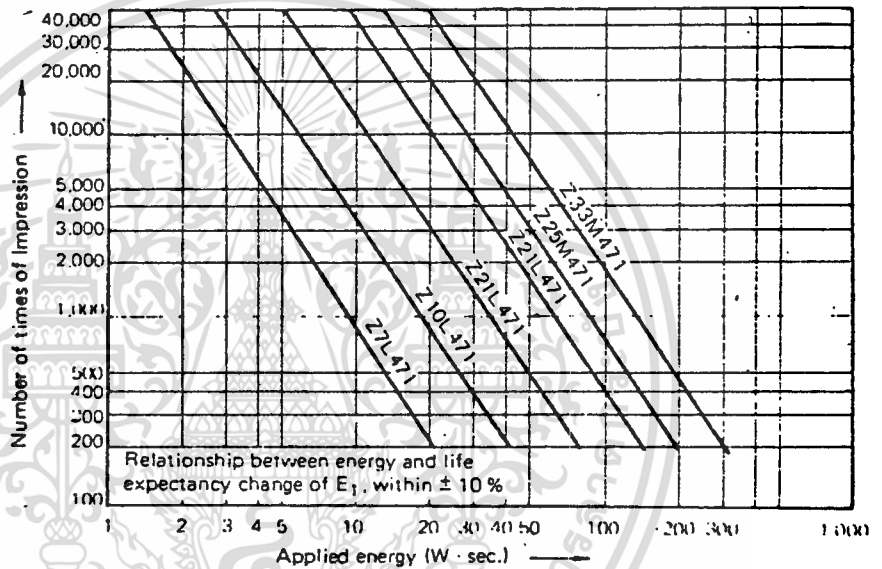
Voltage vs. current characteristics of Zenamic (M type)



Current duration rating



Energy duration rating (Sinusoidal half wave)



Reliability Standards

No.	Item	Testing Method	Standard												
1	Maximum rated surge value	A standard current of $8 \times 20 \mu\text{sec.}$ is applied twice in the same direction at a 2 minute interval for measuring $E_1$ 30 minutes later.	Change rate of $E_1$ should be within $\pm 10\%$ .												
2	Surge life	A current of $8 \times 20 \mu\text{sec.}$ is applied in the same direction 10,000 times, according to the stipulation as set forth below, for measuring $E_1$ 30 minutes later. <table border="1" style="margin: 10px auto;"> <tr> <td>Z7L</td> <td>Z10L</td> <td>Z15L</td> <td>Z21L</td> <td>Z33M</td> <td>Z33W</td> </tr> <tr> <td>25 A</td> <td>50 A</td> <td>100 A</td> <td>200 A</td> <td>500 A</td> <td>300 A</td> </tr> </table>	Z7L	Z10L	Z15L	Z21L	Z33M	Z33W	25 A	50 A	100 A	200 A	500 A	300 A	Change rate of $E_1$ should be within $\pm 10\%$ .
Z7L	Z10L	Z15L	Z21L	Z33M	Z33W										
25 A	50 A	100 A	200 A	500 A	300 A										
3	A high temperature	Leave the device at $110^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ for $1,000 \pm 12$ hours, then take it out into a normal temperature. $E_1$ is measured 30 minutes later.	Change rate of $E_1$ should be within $\pm 10\%$ .												
4	Load under humid conditions	Place a device in $40^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ and a humidity of 90 ~ 95% and apply an AC rated voltage for $1,000 \pm 8$ hours. Then leave it in a normal temperature and humidity for 30 minutes before measuring $E_1$ .	Change rate of $E_1$ should be within $\pm 10\%$ .												
5	Temperature cycle	Repeat the cycle of $-25^\circ\text{C}$ (30 min.), normal temperature (15 min.), $85^\circ\text{C}$ (30 min.) and normal temperature (15 min.) five times, before measuring the change rate of $E_1$ .	Change rate of $E_1$ should be within $\pm 10\%$ . There should be no abnormal outer appearance.												

INTERSIL

# ICM7215 Complementary MOS LED Stopwatch Circuit

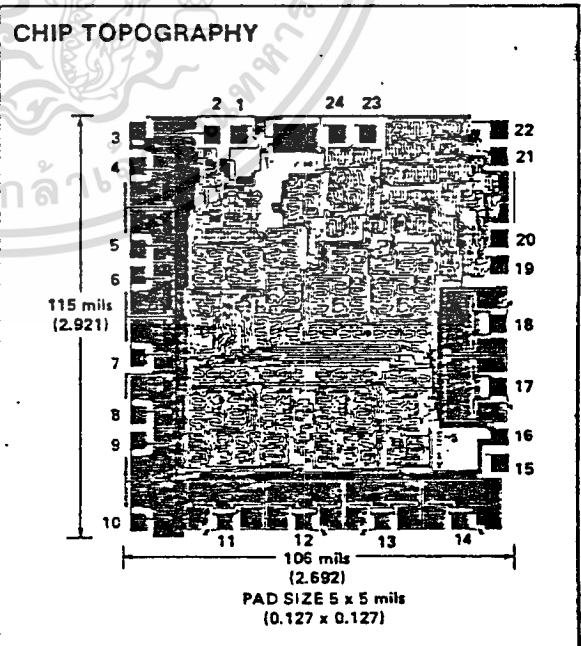
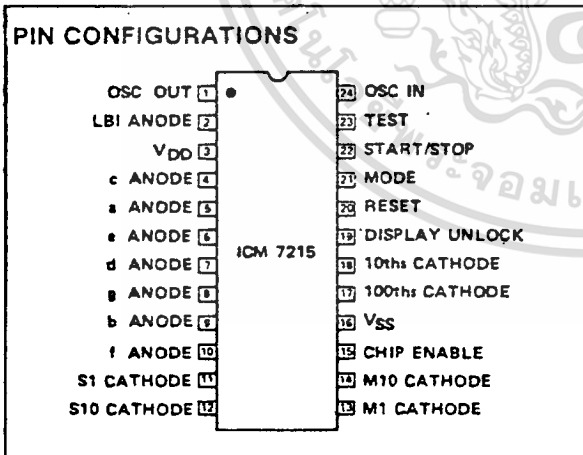
### FEATURES

- Total integration: oscillator, divider, decoder, segment and digit drivers on chip
- Four functions: start/stop/reset, split, taylor, time-out
- Retrofit to ICM7205 for split and/or taylor applications
- Six digit display: ranges up to 59 minutes 59.99 seconds
- Requires only three low cost SPST switches without loss of accuracy: start/stop, reset, display unlock
- Chip enable pin to turn off both segment and digit outputs; can be used for multiple circuits driving one display
- Low battery indicator on chip turns on well above minimum operating voltage
- Digit blanking on seconds and minutes to conserve battery life
- High LED drive current: 13mA per segment at 16.7% duty cycle with 4.0 volt supply
- Wide operating range: 2.0 to 5.0 volts
- Oscillator requires only 3.2768MHz crystal and trimming capacitor
- 1KHz multiplex rate prevents flickering display
- Fully protected against static charge, no special handling precautions required

- Can be used easily in four different single function stopwatches or two two-function stopwatches: start/stop/reset with time-out, split with taylor. The component count for a three- or four-function stopwatch will be slightly greater.

### GENERAL DESCRIPTION

The ICM7215 is a fully integrated six digit LED stopwatch circuit fabricated with Intersil's low threshold metal gate CMOS process. The circuit interfaces directly with a six digit/seven segment common cathode LED display. The low battery indicator can be connected to the decimal point anode or to a separate LED lamp. The only components required for a complete stopwatch besides the display are: three SPST switches, a 3.2768MHz crystal, a trimming capacitor, three AA batteries and an on-off switch. For a two function stopwatch or for adding a display off feature one additional slide switch would be required. The circuit divides the oscillator frequency by  $2^{15}$  to obtain 100Hz which is fed to the fractional seconds, seconds and minutes counters. An intermediate frequency is used to obtain the 1/6 duty cycle 1.07KHz multiplex waveforms. The blanking logic provides leading zero blanking for seconds and minutes independently of the clock. The ICM7215 is packaged in a 24-lead plastic DIP.



### ORDERING INFORMATION

ICM 7215 I PG  
 Package (see outline drawing)  
 Temperature Range -20° C to +70° C  
 Type

Order devices by following part number ICM 7215 I PG  
 Order dice by following part number ICM 7215 D

DIMENSIONS IN PARENTHESES ARE MM  
 OTHERS ARE INCHES

# ICM7215



## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage .....	5.5 Volts
Power Dissipation (Note 1) .....	0.75 Watts
Operating Temperature .....	-20°C to +70°C
Storage Temperature .....	-55°C to +125°C
Input and Output Voltage .....	equal to but never exceeding the supply voltage

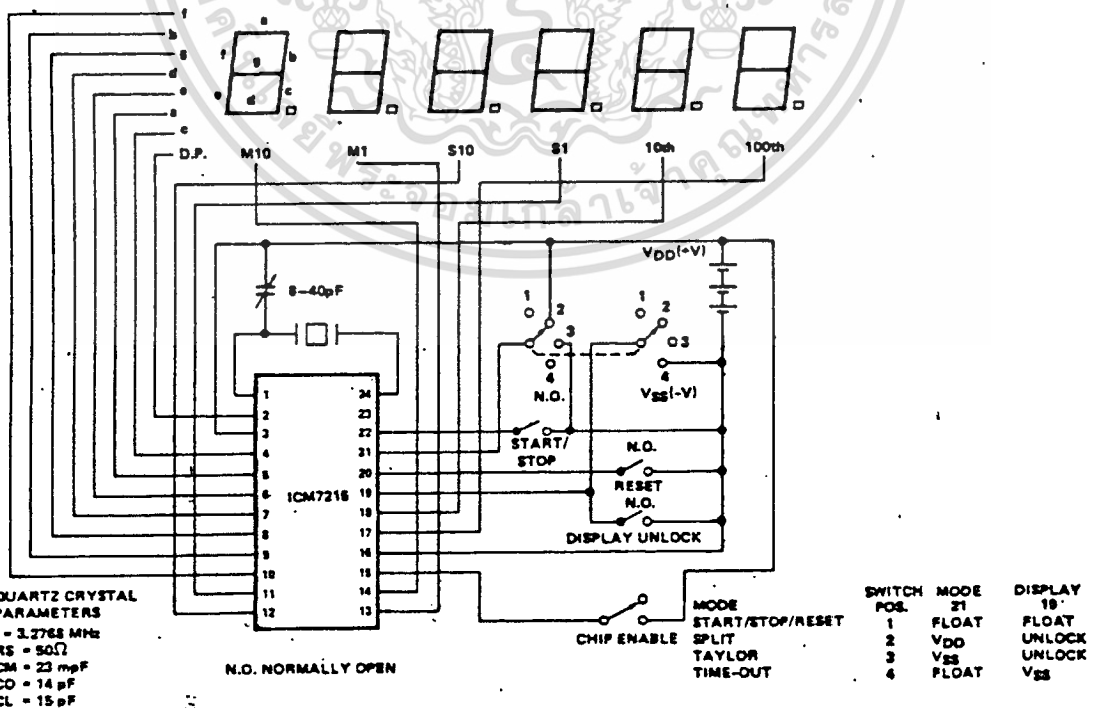
## OPERATING CHARACTERISTICS

TEST CONDITIONS:  $T_A = +25^\circ\text{C}$ , stopwatch circuit,  $V_{DD} = 4.0\text{V}$  unless otherwise specified.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Supply Voltage	$-20^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$	2.0		5.0	Volts
Supply Current	Display off		0.6	1.5	mA
Segment Current	5 segments lit				
Peak	1.8 Volts across display	9.0	13.2		
Average			2.2		
Switch Actuation Current	All inputs except chip enable		20	50	$\mu\text{A}$
Switch Actuation Current	Chip enable		50	200	
Digit Leakage Current	$V_{\text{DIGIT}} = 2.0\text{V}$			50	
Segment Leakage Current	$V_{\text{SEGMENT}} = 2.0\text{V}$			100	
Low Battery Indicator Trigger Voltage		2.2		2.8	Volts
LBI Output Current	$V_{DD} = 2.0\text{V}$ , $V_{LBI} = 1.6\text{V}$		2.0		mA
Oscillator Stability	$V_{DD} = 2.0\text{V}$ to $V_{DD} = 5.0\text{V}$		6		PPM
Oscillator Transconductance	$V_{DD} = 2.0\text{V}$	120			$\mu\text{mho}$
Oscillator Input Capacitance			30		pF

NOTE 1: This value of power dissipation refers to the package and will not be obtained under normal conditions. The output devices on the ICM7215 have very low impedance characteristics, especially the digit cathode drivers. If these devices are shorted to a low impedance power supply, the current could be as high as 300mA. This will not damage the device momentarily, but if the short circuit condition is not removed immediately probable device failure will occur.

## STOPWATCH CIRCUIT

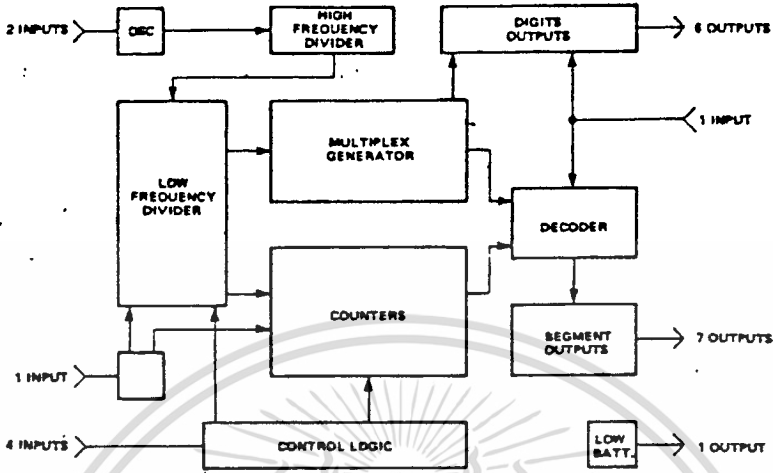


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

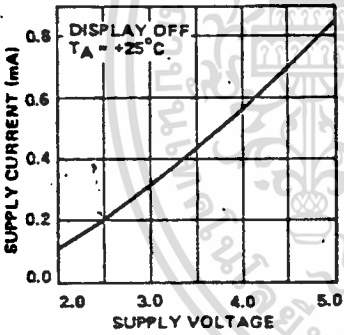
ICM7215

BLOCK DIAGRAM

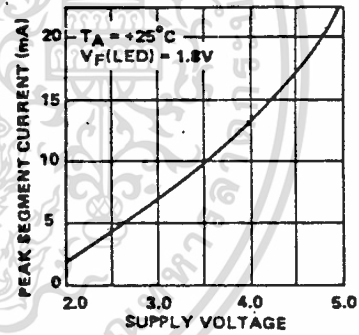


TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

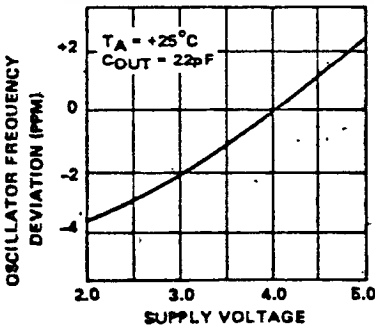
SUPPLY CURRENT VS VOLTAGE



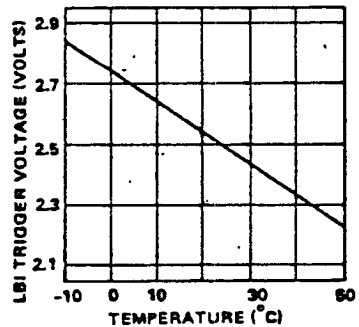
SEGMENT CURRENT VS SUPPLY VOLTAGE



OSC. STABILITY VS SUPPLY VOLTAGE



LBI TRIGGER VOLTAGE VS TEMPERATURE



# ICM7215

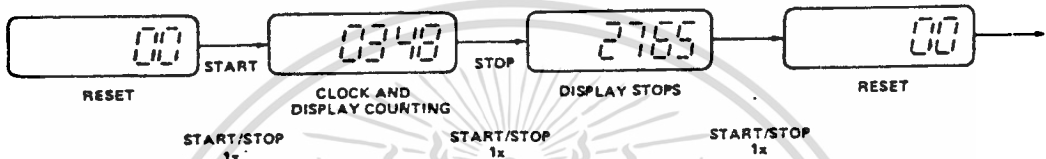
## FUNCTIONAL OPERATION

Turning on the stopwatch will bring up the reset state where the fractional seconds are on displaying 00 and the other digits are blanked. This display always indicates that the stopwatch is ready to go.

The display can be turned off in any mode by connecting the chip enable input to V<sub>DD</sub>.

## START/STOP/RESET

When the mode input is floating and the display input is floating or connected to V<sub>DD</sub>, the circuit is in the start/stop/reset mode.

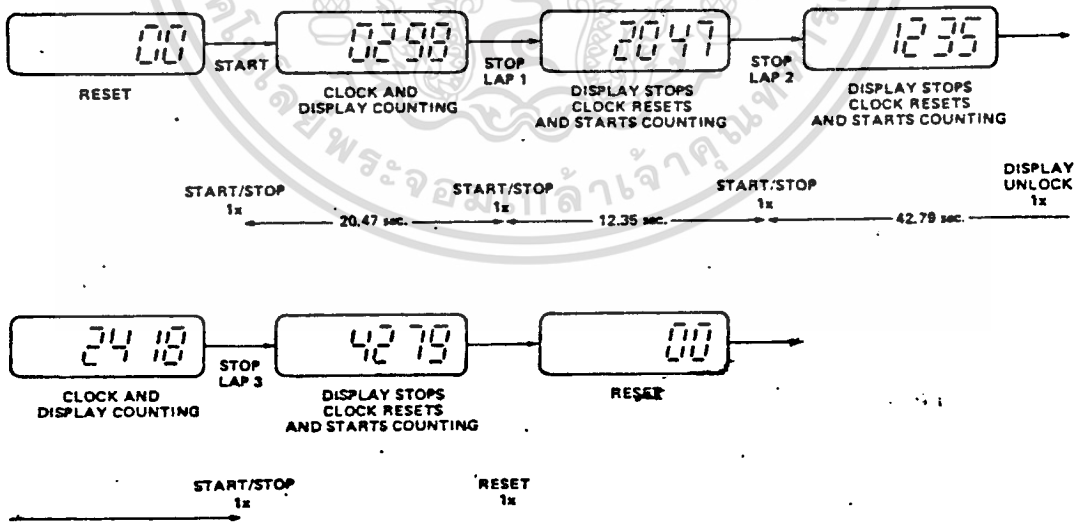


The start/stop/reset mode can be used for single event timing in a one-button stopwatch. An additional reset switch can be used to provide reset at any time capability. The diagram indicates the operation and the results. To time another event the display must be reset before the start of the event.

Seconds will be displayed after one second, minutes after one minute. The range of the stopwatch is 59 minutes 59.99 seconds. If an event exceeds one hour, the number of hours must be remembered by the user. Leading zeroes are not blanked after one hour.

## TAYLOR

When the mode input is connected to V<sub>SS</sub>, the stopwatch is in the taylor or sequential mode.



As depicted graphically above, each split time is measured from zero in the taylor mode, i.e., after stopping the watch, the counters reset to zero momentarily and start counting the next interval. The time displayed is the time elapsed since

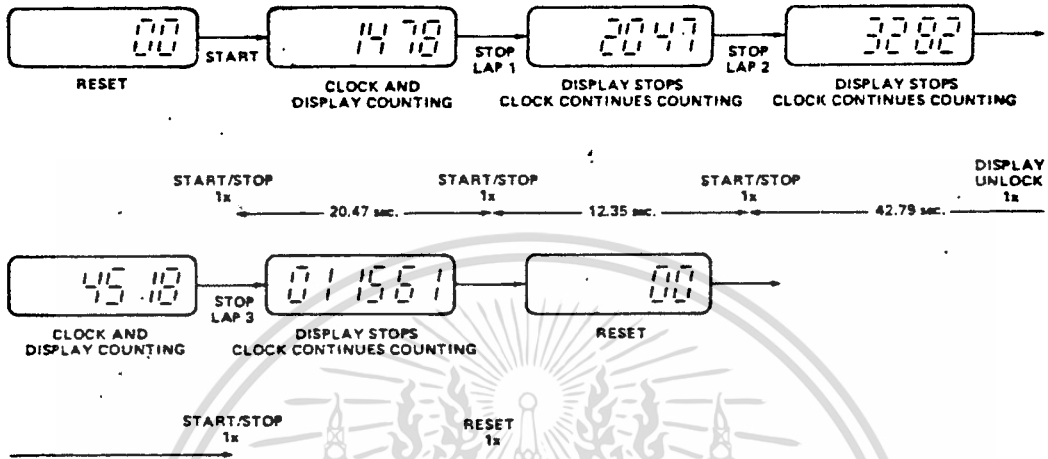
the last activation of start/stop. The display is stationary after the first interval unless the display unlock is used to show the running clock. Reset can be used at any time.

# ICM7215

INTERSiL

## SPLIT

When the mode input is connected to V<sub>DD</sub>, the stopwatch is in the split mode.

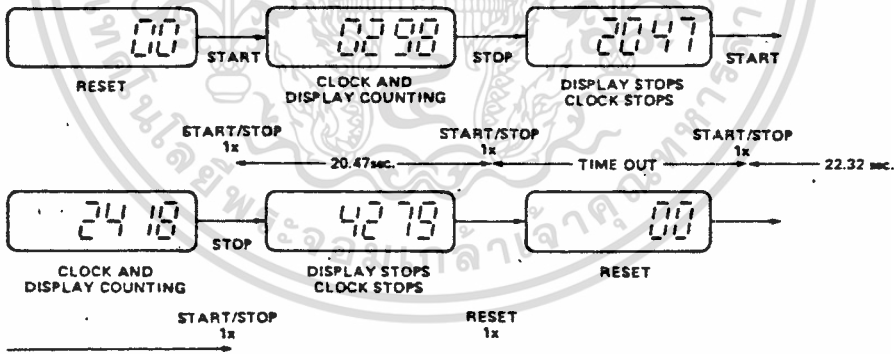


The split mode differs from the Taylor in that the lap times are cumulative in the split mode. The counters do not reset or stop after the first start until reset is activated. Any time

displayed is the cumulative time elapsed since the first start after reset. Display unlock can be used to let the display 'catch up' with the clock. Reset can be used at any time.

## TIME OUT

When the mode input is floating and the display input is tied to V<sub>SS</sub>, the stopwatch is in the time-out mode.



In the time-out mode the clock and display alternately start and stop with activations of the start/stop switch. Reset can

be used at any time. The display unlock button is bypassed in this mode.

## LOW BATTERY INDICATOR

The on-chip low battery indicator is intended for use with a small LED lamp or the decimal points on a standard LED display. The output is the drain of a p-channel transistor two-thirds the size of the segment drivers. The LBI circuitry is designed to provide a trigger voltage of approximately 2.5 volts at room temperature. With normal AA type batteries the discharge characteristics will provide many hours of accurate timekeeping after the indicator comes on. However, the wide voltage spread between the LBI voltage and minimum operating voltage is required to guarantee low battery indication under worst case conditions.

## SWITCH CHARACTERISTICS

The ICM7215 is designed for use with SPST switches throughout. On the display unlock and reset inputs the characteristics of the switches are unimportant, since the circuit responds to a logic level held for any level of time, however short. Switch bounce on these inputs does not need to be specified. The start/stop input, however, responds to an edge and it requires a switch with less than 15msec of switch bounce. The bounce protection circuitry has been specifically designed to let the circuit respond to the first edge of the signal, so as to preserve the full accuracy of the system.

# ICM7215

## APPLICATION NOTES

### OSCILLATOR NOTES

The oscillator of the ICM7215 includes all components on chip except the 3.2768 MHz crystal and the trimming capacitor. The oscillator input capacitance has a nominal value of 30 pf. The circuit is designed to work with a crystal with a load capacitance of approximately 15 pf. If the crystal has characteristics as shown on page 2, an 8-40pf trimming capacitor will be adequate for a tuning tolerance of ±30PPM on the crystal. If the crystal's static capacitance is significantly lower, a narrower trimming range may be selected. After deciding on a crystal and a nominal load capacitance, take the worst case values of C<sub>in</sub>, C<sub>out</sub> and R<sub>s</sub> and calculate the g<sub>m</sub> required by:

$$g_m = \omega^2 C_{out} R_s \left\{ 1 + \frac{C_o (C_{in} + C_{out})}{C_{in} C_{out}} \right\}^2$$

- C<sub>o</sub> = static capacitance
- R<sub>s</sub> = series resistance
- C<sub>in</sub> = input capacitance
- C<sub>out</sub> = output capacitance
- ω = 2π x crystal frequency

The resulting g<sub>m</sub> should be less than half the g<sub>m</sub> specified for the device. If it is not, a lower value of crystal series resistance and/or load capacitance should be specified.

### OSCILLATOR TUNING

To avoid loading the oscillator when tuning, a frequency counter cannot be connected to the oscillator itself. Easy tuning can be accomplished by using the 10th or 100th cathode with the device reset. The frequency on the cathode should be tuned to 1066.667 Hz, which is equivalent to a period of 937.5 microseconds.

### TEST POINT

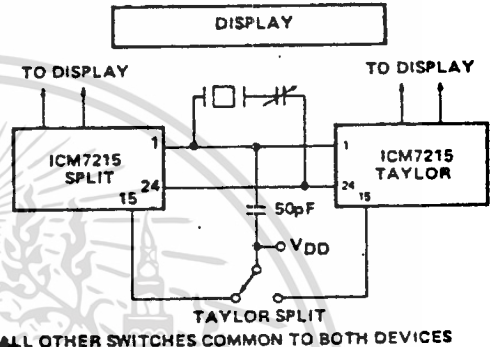
The test point input is used for high speed testing of the device. When the input is pulsed low, a latch is set which speeds up counting by a factor of 32. Also, each pulse on the test point rapid advances both minutes and seconds in a parallel mode. To accurately rapid advance the signal applied to the test point must be free of switch bounce. The circuit is taken out of the test point mode by using either reset or start/stop.

### REPLACING THE ICM7205 WITH THE ICM7215

The ICM7215 is designed to be compatible with circuits using the ICM7205. If the 7205 is used only in the split mode no changes are required. If the 7205 is used in the taylor mode and the split/taylor input (pin 21) is left open, a jumper from pin 21 to V<sub>ss</sub> must be added when converting to the 7215. A jumper may also be needed if the 7205 is used with a split/taylor switch. Once the jumper has been added the board can be used with either device.

### CHIP ENABLE

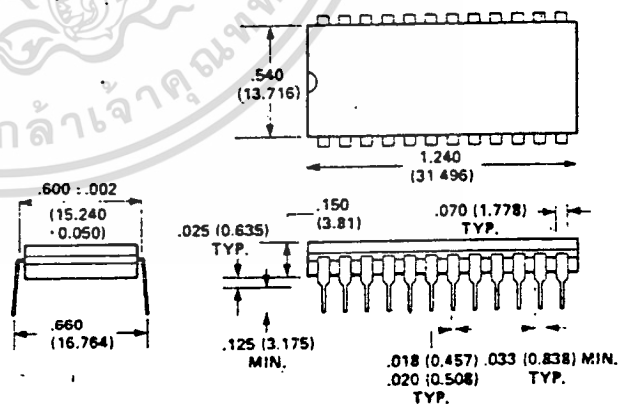
The chip enable input is used to disable both segment and digit drivers without affecting any of the functions of the device. When the chip enable input is floating or connected to V<sub>ss</sub>, the display is enabled. When the chip enable input is tied to V<sub>DD</sub> the display is turned off. One example of the many possible uses of this feature is driving one display from two ICM7215 devices, one in the split mode and the other in the taylor mode. The circuit below indicates how the user can obtain lap and cumulative readings of the same event.



### LATCHUP CONSIDERATIONS

Due to the inherent structure of junction isolated CMOS devices, the circuit can be put in a latchup mode if large currents are injected into device inputs or outputs. For this reason special care should be taken in a system with multiple power supplies to prevent voltages being applied to inputs and/or outputs before power is applied to V<sub>DD</sub> and V<sub>ss</sub>. If only inputs are affected latchup can also be prevented by limiting the current into the input terminal to less than 1mA.

### PACKAGE DIMENSIONS



DIMENSIONS IN PARENTHESES ARE MM  
OTHERS ARE INCHES

NOTE: All dimensions in parentheses are metric.

# INTERSIL

## ICM7555 Low Power General Purpose Timer

## ICM7556 Low Power Dual Timer

(High Performance Equivalents of the 555, 556, and 355 timers)

### FEATURES

- Exact equivalent in most cases for SE/NE555 or 556 or the 355.
- Low Supply Current 80 $\mu$ A Typ. (ICM7555)  
160 $\mu$ A Typ. (ICM7556)
- Extremely low trigger, threshold and reset currents - 20pA Typical
- High speed operation - 500 kHz guaranteed
- Wide operation supply voltage range guaranteed 2 to 18 volts
- Well behaved Reset function - No crowbarring of supply during output transition.
- Can be used with higher impedance timing elements than regular 555/6 for longer RC time constants.
- Timing from microseconds through hours
- Operates in both astable and monostable modes
- Adjustable duty cycle
- High output source/sink driver-can drive TTL/CMOS
- Typical temperature stability of 0.005% per °C at 25°C
- Normally on and normally off output with very low offsets
- Completely static protected - no special handling considerations.

### GENERAL DESCRIPTION

The ICM7555/6 are CMOS RC timers providing significantly improved performance over the standard SE/NE555/6 and 355 timers, while at the same time being direct replacements for those devices in most applications. Improved parameters include the low supply current, wide operating supply voltage range, low THRESHOLD, TRIGGER and RESET currents, no crowbarring of the supply current during any output transition, higher frequency performance and no requirement to decouple CONTROL VOLTAGE for stable operation.

Specifically, the ICM7555/6 are stable controllers capable of producing accurate time delays or frequency. The ICM7556 is a dual ICM7555, with the two timers operating independently of one another, sharing only V<sup>+</sup>(V<sub>CC</sub>) and V<sup>-</sup>(GND). In the time delay one shot mode of operation for each circuit, the time is precisely controlled by one external resistor and capacitor. For astable operation as an oscillator, the free running frequency and the duty cycle are both accurately controlled by two external resistors and one capacitor, unlike the regular bipolar 555/6 devices, which also requires the CONTROL VOLTAGE terminal to be decoupled with a capacitor to prevent multiple output glitching during a transition. The circuits are triggered and reset on falling (negative) waveforms, and the output inverter can source or sink large currents to drive TTL loads or provide minimal offsets to drive CMOS loads.

### APPLICATIONS

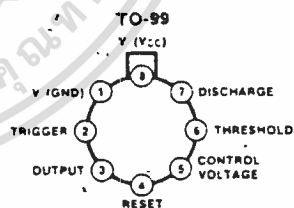
- Precision Timing
- Pulse Generation
- Sequential Timing
- Time Delay Generation
- Pulse Width Modulation
- Pulse Position Modulation
- Missing Pulse Detector

### ORDERING INFORMATION

ORDER PART NUMBER	TEMPERATURE RANGE	PACKAGE
ICM7555IPA	-20 to 70°C	8 Lead MiniDip
ICM7555ITY	-20 to 70°C	TO-99 Can
ICM7555MTY	-55 to +125°C	TO-99 Can
ICM7556IPD	-20 to -70°C	14 Lead Plastic DIP
ICM7556MDD	-55 to -125°C	14 Lead Ceramic DIP
ICM7555D		DICE
ICM7556D		DICE

### PIN CONFIGURATIONS (Top View)

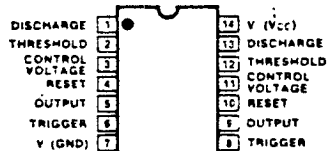
ICM7555



8-PIN DIP



ICM7556



# ICM7555/ICM7556

INTERMIL

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (NOTE 1)

Supply Voltage $V^+-V^-$	+18 Volts	Operating Temperature Range	
Input Voltage (Note 2)	Trigger	$\leq V^- + 0.3V$	ICM7555IPA ..... -20°C to +70°C
	Threshold	to $\geq V^- - 0.3V$	ICM7555ITY ..... -20°C to +70°C
	Reset		ICM7556IPD ..... -20°C to +70°C
	Control Voltage		ICM7555MTY ..... -55°C to +125°C
Output Current	100 mA	ICM7556MDD ..... -65°C to +150°C	
Power Dissipation (Note 3)	ICM7555	300 mW	Storage Temperature ..... -65°C to +150°C
	ICM7555	200 mW	Lead Temperature (Soldering 60 Seconds) ..... +300°C

## OPERATING CHARACTERISTICS ( $T_A = 25^\circ C$ , $V^+-V^- = +2$ to $+15$ Volts unless other specified)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	VALUE			UNITS
		MIN	TYP	MAX	
Supply Voltage	-20°C ≤ $T_A$ ≤ +70°C -55°C ≤ $T_A$ ≤ +125°C	2 3		18 16	V
Supply Current (Note 4)	ICM7555 $V^+-V^- = 2V$ $V^+-V^- = 18V$		60 120	200 300	μA
Supply Current (Note 4)	ICM7556 $V^+-V^- = 2V$ $V^+-V^- = 18V$		120 240	400 600	
Timing Error (Note 5)	$R_A, R_B = 1k$ to $100k$ $C = 0.1\mu F$				% ppm/°C %/Volt
Initial Accuracy			2.0		
Drift with Temperature			50		
Drift with Supply Voltage	$V^+-V^- = 5V$		1.0		
Threshold Voltage			$2/3(V^+-V^-)$		V
Trigger Voltage			$1/3(V^+-V^-)$		V
Trigger Current	$V^+-V^- = 18V$ $V^+-V^- = 5V$ $V^+-V^- = 2V$		50 10 1		pA
Threshold Current	$V^+-V^- = 18V$ $V^+-V^- = 5V$ $V^+-V^- = 2V$		50 10 1		
Reset Current	$V_{RESET} = V^-$ $V^+-V^- = 18V$ $V^+-V^- = 5V$ $V^+-V^- = 2V$		100 20 2		
Reset Voltage	$V^+-V^- = 18V$ $V^+-V^- = 2V$	0.4 0.4	0.7 0.7	1.0 1.0	V
Control Voltage Lead			$2/3(V^+-V^-)$		V
Output Voltage Drop	Output Lo $V^+-V^- = 18V$ $V^+-V^- = 5V$ Output Hi $V^+-V^- = 18V$ $V^+-V^- = 5V$	$I_{SINK} = 3.2mA$ $I_{SINK} = 3.2mA$ $I_{SOURCE} = 1.0mA$ $I_{SOURCE} = 1.0mA$	0.1 0.15 17.8 4.0	0.4 0.4	V
Rise Time of Output	$R_L = 10Mohms$ $C_L = 7pF$ $V^+-V^- = 5V$		40.0		nS
Fall Time of Output	$R_L = 10Mohms$ $C_L = 7pF$ $V^+-V^- = 5V$		40.0		nS
Guaranteed Max Osc Freq	Astable Operation	500			kHz

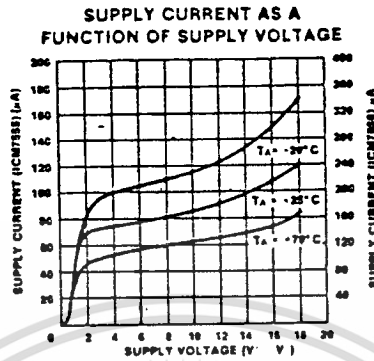
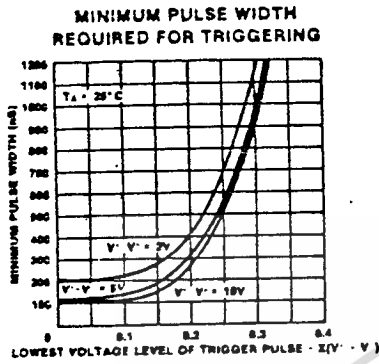
### NOTES:

- Absolute Maximum ratings define stress limitations which, if exceeded, may permanently damage the device. These ratings may not be continuous duty ratings. For continuous operation these devices must be operated under the conditions defined under "OPERATING CHARACTERISTICS."
- Due to the SCR structure inherent in the CMOS process used to fabricate these devices, connecting any terminal to a voltage greater than  $V^- + 0.3V$  or less than  $V^- - 0.3V$  may cause destructive latchup. For this reason it is recommended that no inputs from external sources not operating from the same power supply be applied to the device before its power supply is established. In multiple systems, the supply of the ICM7555/6 must be turned on first.
- Junction temperatures should not exceed 135°C and the power dissipation must be limited to 20mW at 125°C. Below 125°C power dissipation may be increased to 300mW at 25°C. Derating factor is approximately 3mW/°C (7556) or 2mW/°C (7555).
- The supply current value is essentially independent of the TRIGGER, THRESHOLD and RESET voltages.
- For supply voltages between 5 and 15 volts.

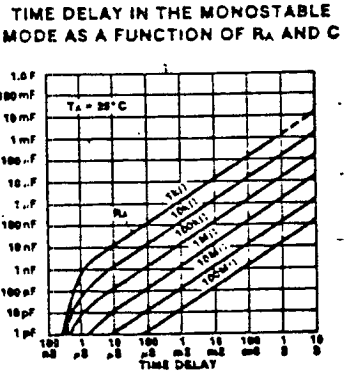
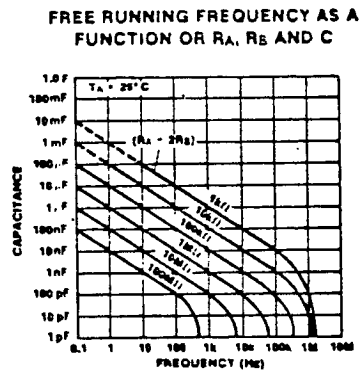
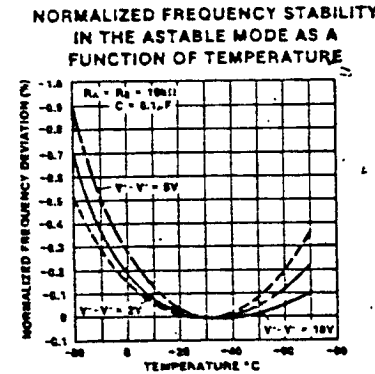
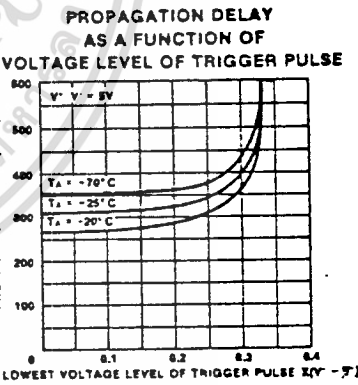
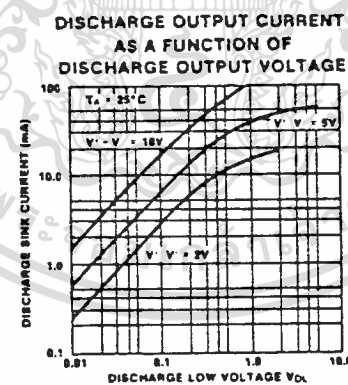
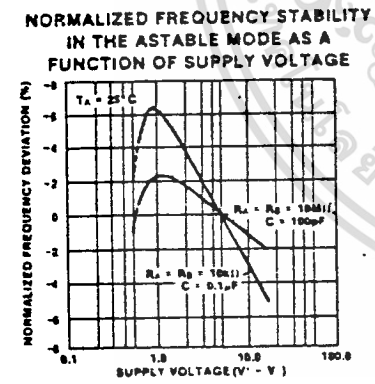
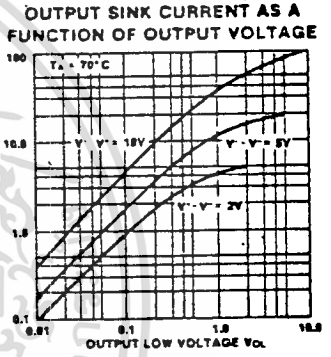
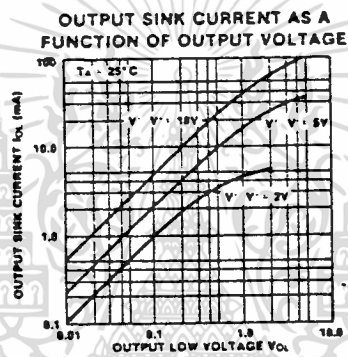
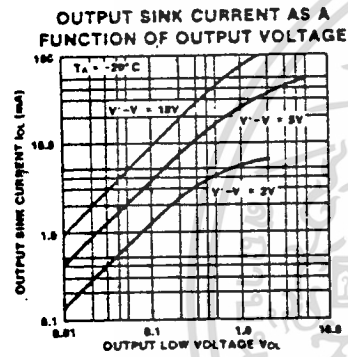
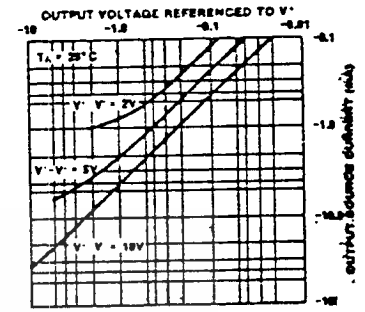
# ICM7555/ICM7556



## TYPICAL CHARACTERISTICS



## OUTPUT SOURCE CURRENT AS A FUNCTION OF OUTPUT VOLTAGE



# ICM7555/ICM7556

INTERMIL

## APPLICATION NOTES

### GENERAL

The ICM7555/6 devices are, in most instances, direct replacements for the NE/SE 555/6 devices. However, it is possible to effect economics in the external component count using the ICM7555/6. In general because the bipolar 555/6 devices produce large crowbar currents in the output driver, it is necessary to decouple the power supply lines with a good capacitor close to the device. The current transient is shown in Figure 2.

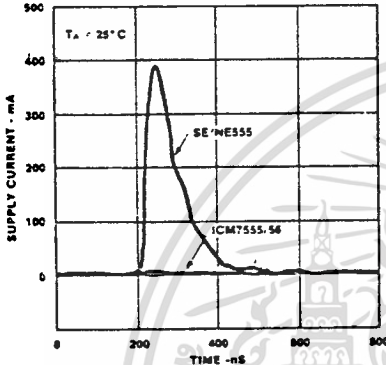


Figure 2: Supply Current Transient for a Standard Bipolar 555 During an Output Transition

The ICM7555/6 produces supply current spikes of only 2-3 mA instead of 300-400 mA and supply decoupling is normally not necessary. Secondly, in most instances, the CONTROL VOLTAGE decoupling capacitors are not required since the input impedance of the CMOS comparators on chip are very high. **THUS, FOR MANY APPLICATIONS 2 CAPACITORS CAN BE SAVED USING AN ICM7555 AND 3 CAPACITORS WITH AN ICM7556.**

### POWER SUPPLY CONSIDERATIONS

Although the supply current consumed by the ICM7555/6 devices is very low, the total system supply can be high unless the timing components are high impedance. Therefore, use high values for  $R_A$  and  $R_B$  and low values for  $C$  in Figures 3 and 4.

### OUTPUT DRIVE CAPABILITY

The output driver consists of a CMOS inverter capable of driving most logic families including CMOS and TTL. As such, if driving CMOS, the output swing at all supply voltages will equal the supply voltage. At a supply voltage of 4.5 volts or more the ICM7555/6 will drive at least 2 standard TTL loads.

### ASTABLE OPERATION

The circuit can be connected to trigger itself and free run as a multivibrator. The external capacitor charges through  $R_A$  and  $R_B$  and discharges through  $R_B$  only. Thus the duty cycle may be precisely set by the ratio of these two resistors. In this mode of operation, the capacitor charges and discharges between 1/3 and 2/3 ( $V^+ - V^-$ ). As in the triggered mode, the charge and discharge times, and therefore the frequency, are essentially independent of the supply voltage.

The frequency of oscillation is given by:

$$f = \frac{1}{t} = \frac{1.46}{(R_A + 2 R_B)C}$$

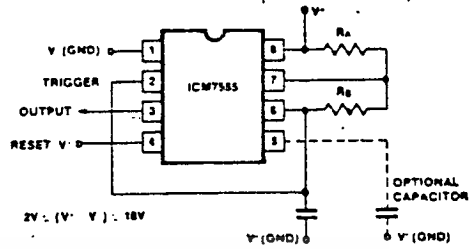


Figure 3: Astable Operation

### MONOSTABLE OPERATION

In this mode of operation, the timer functions as a one-shot. Initially the external capacitor (C) is held discharged by a transistor inside the timer. Upon application of a negative trigger pulse to pin 2, the flip flop is set which releases the short circuit across the external capacitor and drives the output high. The voltage across the capacitor now increases exponentially with a time constant  $\tau = R_A C$ . When the voltage across the capacitor equals 2/3 ( $V^+ - V^-$ ), the comparator resets the flip flop, which in turn discharges the capacitor rapidly and also drives the output to its low state.

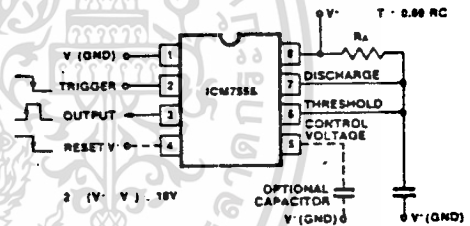


Figure 4: Monostable Operation

### CONTROL VOLTAGE

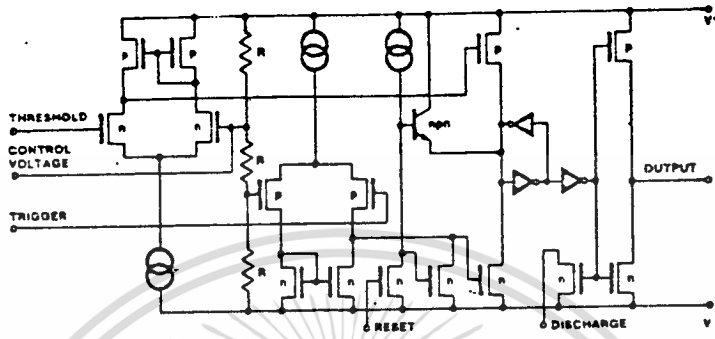
The CONTROL VOLTAGE terminal permits the two trip voltages for the THRESHOLD and TRIGGER internal comparators to be controlled. This provides the possibility of oscillation frequency modulation in the astable mode or even inhibition of oscillation, depending on the applied voltage. In the monostable mode, delay times can be changed by varying the applied voltage to the CONTROL VOLTAGE pin.

### RESET

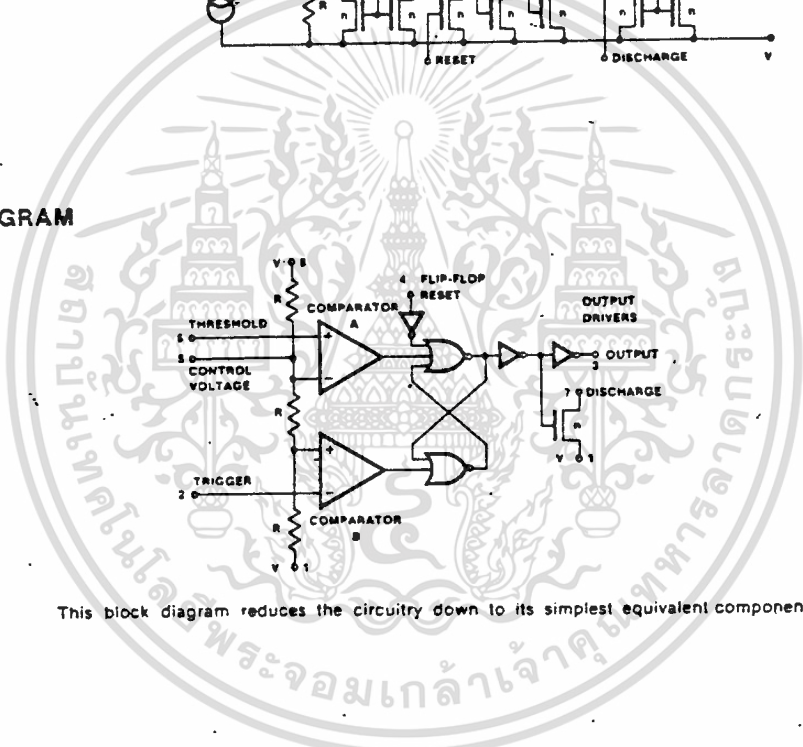
The RESET terminal is designed to have essentially the same trip voltage as the standard bipolar 555/6, i.e. 0.6 to 0.7 volts. At all supply voltages  $V^-$  to  $V^+$  it represents an extremely high input impedance (Mohms). The mode of operation of the RESET function is, however, much improved over the standard bipolar 555/6 in that it controls only the internal flip flop, which in turn controls simultaneously the state of the OUTPUT and DISCHARGE pins. However, with the 555/6 the situation is much more complex and undesirable. When the RESET pin is slowly taken negatively through its trip voltage, the DISCHARGE terminal is initially partially turned on. Then the internal flip flop has its state changed. Finally the OUTPUT and the DISCHARGE pins are put into low impedance "LOW" states.

**ICM7555/ICM7556**

**EQUIVALENT CIRCUIT**



**BLOCK DIAGRAM**



This block diagram reduces the circuitry down to its simplest equivalent components.

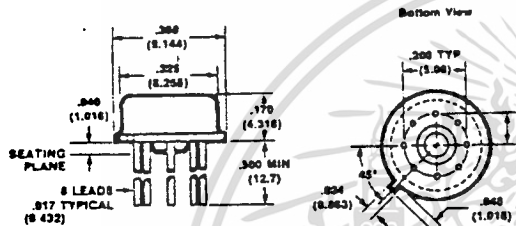
**TRUTH TABLE**

THRESHOLD VOLTAGE	TRIGGER VOLTAGE	RESET	OUTPUT	DISCHARGE SWITCH
DONT CARE	DONT CARE	LOW	LOW	ON
$>2/3(V^+ - V^-)$	$>2/3(V^+ - V^-)$	HIGH	LOW	ON
$1/3 < V_{TH} < 2/3$	$1/3 < V_{TH} < 2/3$	HIGH	?	?
$<1/3(V^+ - V^-)$	$<1/3(V^+ - V^-)$	HIGH	HIGH	OFF

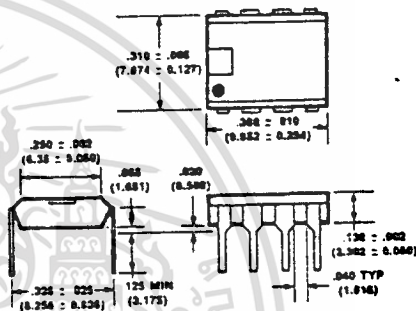
# ICM7555/ICM7556

## PACKAGE OUTLINES

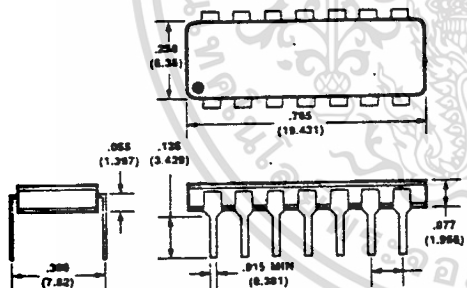
TO-99 PACKAGE



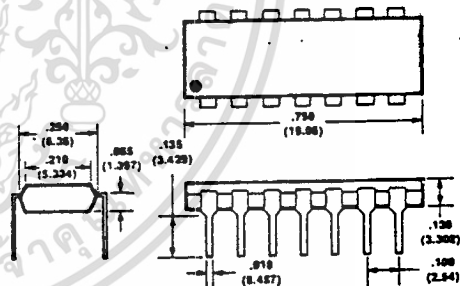
8 LEAD PLASTIC DIP



14 PIN HERMETIC DUAL-IN-LINE PACKAGE



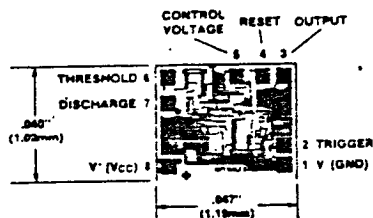
14 PIN PLASTIC DUAL-IN-LINE PACKAGE



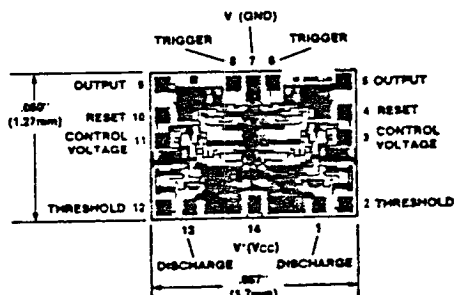
NOTES 1 All leads gold plated Kovar  
2 All dimensions in inches (mm)

## CHIP TOPOGRAPHIES

ICM7555



ICM7556





**MC14049UB  
MC14050B**

**HEX BUFFERS**

The MC14049UB hex inverter/buffer and MC14050B noninverting hex buffer are constructed with MOS P-channel and N-channel enhancement mode devices in a single monolithic structure. These complementary MOS devices find primary use where low power dissipation and/or high noise immunity is desired. These devices provide logic-level conversion using only one supply voltage,  $V_{CC}$ . The input-signal high level ( $V_{IH}$ ) can exceed the  $V_{CC}$  supply voltage for logic-level conversions. Two TTL/DTL Loads can be driven when the devices are used as CMOS-to-TTL/DTL converters ( $V_{CC} = 5.0\text{ V}$ ,  $V_{OL} \leq 0.4\text{ V}$ ,  $I_{OL} \geq 3.2\text{ mA}$ ). Note that pin 16 is not connected internally on these devices; consequently connections to this terminal will not affect circuit operation.

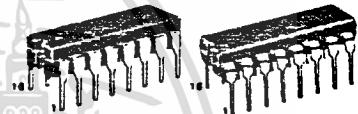
- High Source and Sink Currents
- High-to-Low Level Converter
- Quiescent Current = 2.0 nA/package typical @ 5 Vdc
- Supply Voltage Range = 3.0 Vdc to 18 Vdc
- Meets JEDEC UB Specifications—MC14049UB  
Meets JEDEC B Specification—MC14050B

**CMOS SSI**

(LOW-POWER COMPLEMENTARY MOS)

**HEX BUFFERS**

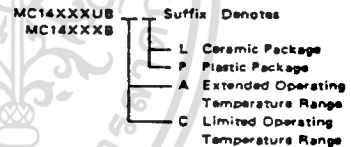
Inverting — MC14049UB  
Noninverting — MC14050B



**L SUFFIX  
CERAMIC PACKAGE  
CASE 620**

**P SUFFIX  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 648**

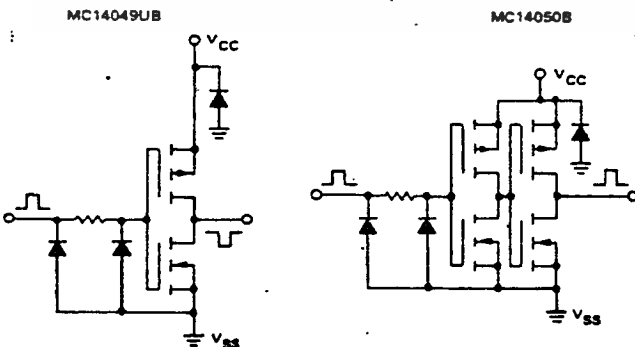
**ORDERING INFORMATION**



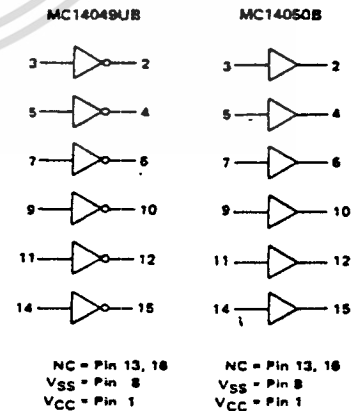
**MAXIMUM RATINGS** (Voltages referenced to  $V_{SS}$ , Pin 8)

Rating	Symbol	Value	Unit
DC Supply Voltage	$V_{DD}$	-0.5 to +18	Vdc
Input Voltage, All Inputs	$V_{in}$	-0.5 to +18	Vdc
DC Current Drain per Input Pin	I	10	mAdc
DC Current Drain per Output Pin	I	45	mAdc
Operating Temperature Range — AL Device	$T_A$	-55 to +125	°C
		-40 to +85	°C
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-65 to +150	°C

**CIRCUIT SCHEMATIC  
(1/6 OF CIRCUIT SHOWN)**



**LOGIC DIAGRAMS**



## MC14049UB • MC14050B

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	VDD Vdc	T <sub>low</sub> *		25°C			T <sub>high</sub> *		Unit
			Min	Max	Min	Typ	Max	Min	Max	
Output Voltage V <sub>in</sub> = V <sub>DD</sub> or 0	"0" Level VOL	5.0	-	0.05	-	0	0.05	-	0.05	Vdc
		10	-	0.05	-	0	0.05	-	0.05	
		15	-	0.05	-	0	0.05	-	0.05	
	"1" Level VOH	5.0	4.95	-	4.95	5.0	-	4.95	-	Vdc
		10	9.95	-	9.95	10	-	9.95	-	
		15	14.95	-	14.95	15	-	14.95	-	
Input Voltage #MC14049UB (V <sub>O</sub> = 4.5 Vdc) (V <sub>O</sub> = 9.0 Vdc) (V <sub>O</sub> = 13.5 Vdc)  (V <sub>O</sub> = 0.5 Vdc) (V <sub>O</sub> = 1.0 Vdc) (V <sub>O</sub> = 1.5 Vdc)	"0" Level VIL	5.0	-	1.0	-	2.25	1.0	-	1.0	Vdc
		10	-	2.0	-	4.50	2.0	-	2.0	
		15	-	2.5	-	6.75	2.5	-	2.5	
	"1" Level VIH	5.0	4.0	-	4.0	2.75	-	4.0	-	Vdc
		10	8.0	-	8.0	5.50	-	8.0	-	
		15	12.5	-	12.5	8.25	-	12.5	-	
Input Voltage #MC14050B (V <sub>O</sub> = 0.5 Vdc) (V <sub>O</sub> = 1.0 Vdc) (V <sub>O</sub> = 1.5 Vdc)  (V <sub>O</sub> = 4.5 Vdc) (V <sub>O</sub> = 9.0 Vdc) (V <sub>O</sub> = 13.5 Vdc)	"0" Level VIL	5.0	-	1.5	-	2.25	1.5	-	1.5	Vdc
		10	-	3.0	-	4.50	3.0	-	3.0	
		15	-	4.0	-	6.75	4.0	-	4.0	
	"1" Level VIH	5.0	3.5	-	3.5	2.75	-	3.5	-	Vdc
		10	7.0	-	7.0	5.50	-	7.0	-	
		15	11	-	11	8.25	-	11	-	
Output Drive Current (AL Device) (VOH = 2.5 Vdc) (VOH = 9.5 Vdc) (VOH = 13.5 Vdc) (VOL = 0.4 Vdc) (VOL = 0.5 Vdc) (VOL = 1.5 Vdc)	Source IOH	5.0	-1.6	-	-1.25	-2.5	-	-0.9	-	mAdc
		10	-1.6	-	-1.3	-2.5	-	-0.9	-	
		15	-4.7	-	-3.75	-10	-	-2.7	-	
	Sink IOL	5.0	3.75	-	3.2	6.0	-	2.2	-	mAdc
		10	10	-	8.0	16	-	5.6	-	
		15	30	-	24	40	-	17.0	-	
Output Drive Current (CL/CP Device) (VOH = 2.5 Vdc) (VOH = 9.5 Vdc) (VOH = 13.5 Vdc) (VOL = 0.4 Vdc) (VOL = 0.5 Vdc) (VOL = 1.5 Vdc)	Source IOH	5.0	-1.5	-	-1.25	-2.5	-	-1.0	-	mAdc
		10	-1.5	-	-1.25	-2.5	-	-1.0	-	
		15	-4.5	-	-3.75	-10	-	-3.0	-	
	Sink IOL	5.0	3.6	-	3.2	6.0	-	2.6	-	mAdc
		10	9.6	-	8.0	16	-	6.6	-	
		15	28	-	24	40	-	19	-	
Input Current (AL Device)	I <sub>in</sub>	15	-	±0.1	-	±0.00001	±0.1	-	±1.0	μAdc
Input Current (CL/CP Device)	I <sub>in</sub>	15	-	±0.3	-	±0.00001	±0.3	-	±1.0	μAdc
Input Capacitance (V <sub>in</sub> = 0)	C <sub>in</sub>	-	-	-	-	10	20	-	-	pF
Quiescent Current (AL Device) (Per Package)	I <sub>DD</sub>	5.0	-	1.0	-	0.002	1.0	-	30	μAdc
		10	-	2.0	-	0.004	2.0	-	80	
		15	-	4.0	-	0.006	4.0	-	120	
Quiescent Current (CL/CP Device) (Per Package)	I <sub>DD</sub>	5.0	-	4.0	-	0.002	4.0	-	30	μAdc
		10	-	8.0	-	0.004	8.0	-	60	
		15	-	16	-	0.006	16	-	120	
Total Supply Current**1 (Dynamic plus Quiescent, Per Package) (C <sub>L</sub> 50 pF on all outputs, all buffers switching)	I <sub>T</sub>	5.0	I <sub>T</sub> = (1.8 μA/kHz)f + I <sub>DD</sub>							μAdc
10	I <sub>T</sub> = (3.5 μA/kHz)f + I <sub>DD</sub>									
15	I <sub>T</sub> = (5.3 μA/kHz)f + I <sub>DD</sub>									

\*T<sub>low</sub> = 55°C for AL Device, -40°C for CL/CP Device.T<sub>high</sub> = +125°C for AL Device, +85°C for CL/CP Device.

1 To Calculate total supply current at loads other than 50 pF:

$$I_T(C_L) = I_T(50 \text{ pF}) + 6 \times 10^{-3} (C_L - 50) V_{DD} f$$

where: I<sub>T</sub> is in μA (per package), C<sub>L</sub> in pF, V<sub>DD</sub> in Vdc, and f in kHz is input frequency.

\*\*The formulas given are for the typical characteristics only at 25°C.

#Noise immunity specified for worst-case input combination

B Suffix Noise Margin for both "1" and "0" level =

1.0 Vdc min @ V<sub>DD</sub> = 5.0 Vdc2.0 Vdc min @ V<sub>DD</sub> = 10 Vdc2.5 Vdc min @ V<sub>DD</sub> = 15 Vdc

UB Suffix Noise Margin for both "1" and "0" level =

0.5 Vdc min @ V<sub>DD</sub> = 5.0 Vdc1.0 Vdc min @ V<sub>DD</sub> = 10 Vdc1.0 Vdc min @ V<sub>DD</sub> = 15 Vdc

MC14049UB • MC14050B

FIGURE 2 - TYPICAL OUTPUT SOURCE CHARACTERISTICS

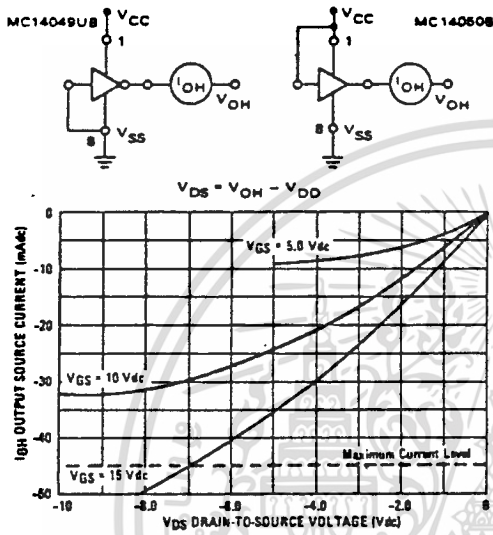


FIGURE 3 - TYPICAL OUTPUT SINK CHARACTERISTICS

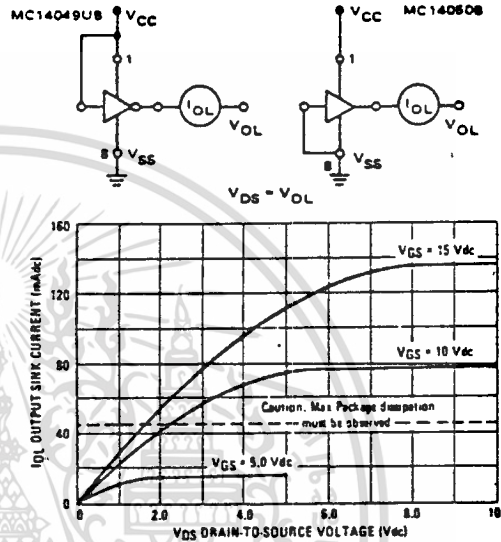


FIGURE 4 - AMBIENT TEMPERATURE POWER DERATING

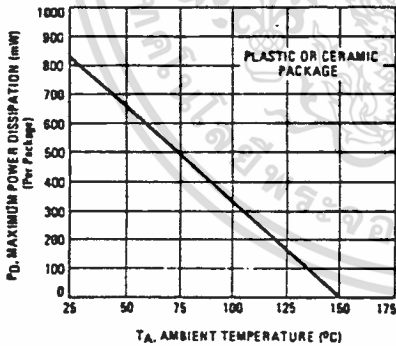
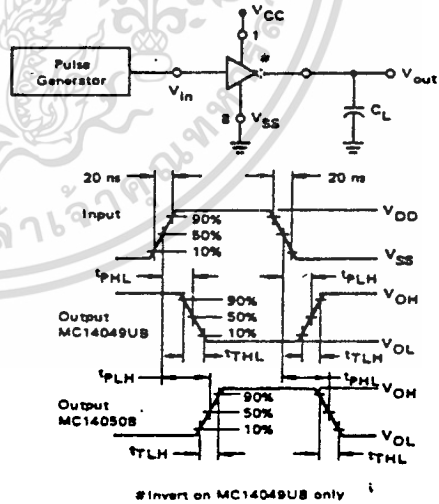


FIGURE 5 - SWITCHING TIME TEST CIRCUIT AND WAVEFORMS



This device contains circuitry to protect the inputs against damage due to high static voltages or electric fields; however, it is advised that normal precautions be taken to avoid application of any voltage higher than maximum rated voltages to this high impedance circuit. For proper operation it is recommended that  $V_{in}$  and  $V_{out}$  be constrained to the range  $V_{SS} < (V_{in} \text{ or } V_{out}) < V_{DD}$ . Unused inputs must always be tied to an appropriate logic voltage level (i.e., either  $V_{SS}$  or  $V_{DD}$ ).

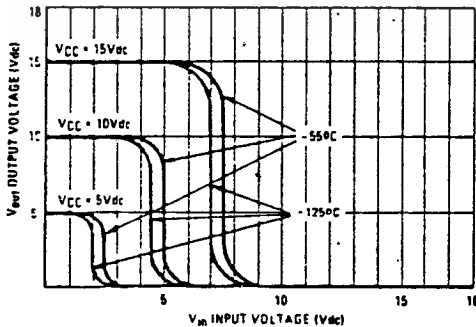
MC14049UB • MC14050B

SWITCHING CHARACTERISTICS\* (C<sub>L</sub> = 50 pF, T<sub>A</sub> = 25°C)

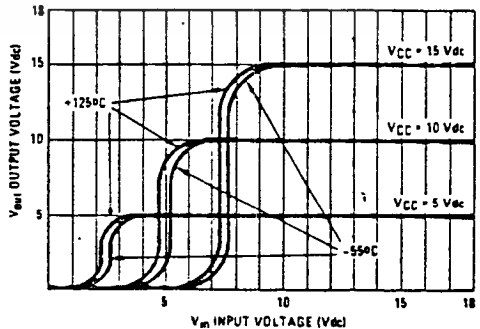
Characteristic	Symbol	V <sub>DD</sub> Vdc	Min	Typ	Max	Unit
<b>MC14049UB</b>						
Output Rise Time TTLH = (0.8 ns/pF) C <sub>L</sub> + 60 ns TTLH = (0.3 ns/pF) C <sub>L</sub> + 35 ns TTLH = (0.27 ns/pF) C <sub>L</sub> + 26.5 ns	TTLH	5.0 10 15	— — —	100 50 40	160 100 60	ns
Output Fall Time TTHL = (0.3 ns/pF) C <sub>L</sub> + 25 ns TTHL = (0.12 ns/pF) C <sub>L</sub> + 14 ns TTHL = (0.1 ns/pF) C <sub>L</sub> + 10 ns	TTHL	5.0 10 15	— — —	40 20 15	60 40 30	ns
Propagation Delay Time tPLH = (0.38 ns/pF) C <sub>L</sub> + 61 ns tPLH = (0.20 ns/pF) C <sub>L</sub> + 30 ns tPLH = (0.11 ns/pF) C <sub>L</sub> + 24.5 ns	tPLH	5.0 10 15	— — —	80 40 30	120 65 50	ns
Propagation Delay Time tPHL = (0.38 ns/pF) C <sub>L</sub> + 11 ns tPHL = (0.12 ns/pF) C <sub>L</sub> + 9 ns tPHL = (0.11 ns/pF) C <sub>L</sub> + 4.5 ns	tPHL	5.0 10 15	— — —	30 15 10	60 30 20	ns
<b>MC14050B</b>						
Output Rise Time TTLH = (0.7 ns/pF) C <sub>L</sub> + 65 ns TTLH = (0.25 ns/pF) C <sub>L</sub> + 37.5 ns TTLH = (0.2 ns/pF) C <sub>L</sub> + 30 ns	TTLH	5.0 10 15	— — —	100 50 40	160 80 60	ns
Output Fall Time TTHL = (0.2 ns/pF) C <sub>L</sub> + 30 ns TTHL = (0.06 ns/pF) C <sub>L</sub> + 17 ns TTHL = (0.04 ns/pF) C <sub>L</sub> + 13 ns	TTHL	5.0 10 15	— — —	40 20 15	60 40 30	ns
Propagation Delay Time tPLH = (0.33 ns/pF) C <sub>L</sub> + 63.5 ns tPLH = (0.19 ns/pF) C <sub>L</sub> + 30.5 ns tPLH = (0.06 ns/pF) C <sub>L</sub> + 27 ns	tPLH	5.0 10 15	— — —	80 40 30	140 80 60	ns
Propagation Delay Time tPHL = (0.2 ns/pF) C <sub>L</sub> + 30 ns tPHL = (0.1 ns/pF) C <sub>L</sub> + 15 ns tPHL = (0.05 ns/pF) C <sub>L</sub> + 12.5 ns	tPHL	5.0 10 15	— — —	40 20 15	80 40 30	ns

\*The formula given is for the typical characteristics only.

FIGURE 1 – TYPICAL VOLTAGE TRANSFER CHARACTERISTICS versus TEMPERATURE  
MC14049UB



MC14050B





# MC14066B

## QUAD ANALOG SWITCH/QUAD MULTIPLEXER

The MC14066B consists of four independent switches capable of controlling either digital or analog signals. This quad bilateral switch is useful in signal gating, chopper, modulator, demodulator and CMOS logic implementation.

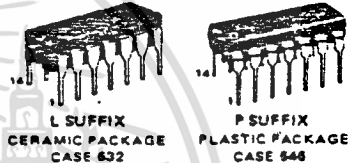
The MC14066B is designed to be pin-for-pin compatible with the MC14016B, but has much lower ON resistance. Input voltage swings as large as the full supply voltage can be controlled via each independent control input.

- High On/Off Output Voltage Ratio - 65 dB typical
- Quiescent Current = 0.5 nA/package typical @ 5 Vdc
- Low Crosstalk Between Switches -50 dB typical @ 8 MHz
- Diode Protection on All Inputs
- Supply Voltage Range = 3.0 Vdc to 18 Vdc
- Transmits Frequencies Up to 65 MHz @ 10 Vdc
- Linearized Transfer Characteristics,  $AR_{ON} < 60 \Omega$  for  $V_{in} = V_{DD}$  to  $V_{SS}$  (at 15V)
- Low Noise - 12 nV/√Cycle,  $f > 1$  kHz typical
- Pin-for-Pin Replacement for CD4016, CD4066, MC14016

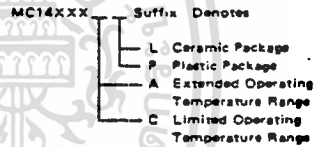
## CMOS SSI

(LOW-POWER COMPLEMENTARY MOS)

## QUAD ANALOG SWITCH QUAD MULTIPLEXER

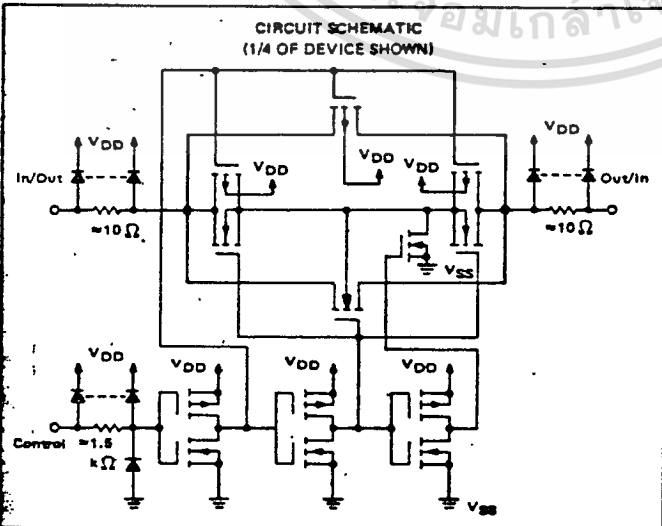
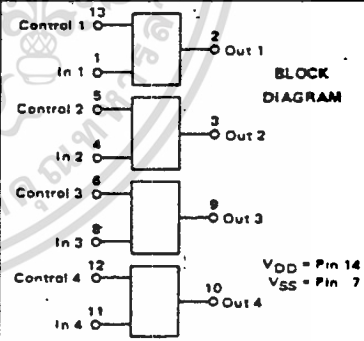


### ORDERING INFORMATION

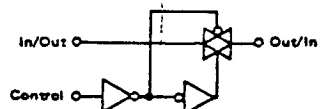


### MAXIMUM RATINGS (Voltages referenced to V<sub>SS</sub>)

Rating	Symbol	Value	Unit
DC Supply Voltage	V <sub>DD</sub>	-0.5 to +18	Vdc
Input Voltage, All Inputs	V <sub>in</sub>	-0.5 to V <sub>DD</sub> + 0.5	Vdc
Through Current	I	25	mAdc
Operating Temperature Range - AL Device	T <sub>A</sub>	-55 to +125	°C
Operating Temperature Range - CL/CP Device		-40 to +85	°C
Storage Temperature Range	T <sub>stg</sub>	-65 to +150	°C



### LOGIC DIAGRAM AND TRUTH TABLE (1/4 OF DEVICE SHOWN)



Control	Switch	Logic Diagram Restrictions
0	OFF	V <sub>SS</sub> ≤ V <sub>in</sub> ≤ V <sub>DD</sub>
1	ON	V <sub>SS</sub> ≤ V <sub>out</sub> ≤ V <sub>DD</sub>

V <sub>control</sub>	V <sub>in</sub> to V <sub>out</sub> Resistance
V <sub>SS</sub>	> 10 <sup>9</sup> Ohms typ
V <sub>DD</sub>	3 × 10 <sup>2</sup> Ohms typ

## MC14066B

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	VDD Vdc	T <sub>low</sub> <sup>a</sup>		25°C			T <sub>high</sub> <sup>a</sup>		Unit
			Min	Max	Min	Typ	Max	Min	Max	
Input Voltage (Control) "0" Level (V <sub>O</sub> = 4.5 or 0.5 Vdc) (V <sub>O</sub> = 9.0 or 1.0 Vdc) (V <sub>O</sub> = 13.5 or 1.5 Vdc)	V <sub>IL</sub>	5.0	-	1.5	-	2.25	1.5	-	1.5	Vdc
		10	-	3.0	-	4.50	3.0	-	3.0	
		15	-	3.75	-	6.75	3.75	-	3.75	
"1" Level (V <sub>O</sub> = 0.5 or 4.5 Vdc) (V <sub>O</sub> = 1.0 or 9.0 Vdc) (V <sub>O</sub> = 1.5 or 13.5 Vdc)	V <sub>IH</sub>	5.0	3.5	-	3.5	2.75	-	3.5	-	Vdc
		10	7.0	-	7.0	5.50	-	7.0	-	
		15	11.25	-	11.25	8.25	-	11.25	-	
Input Current (AL Device) Control	I <sub>in</sub>	15	-	±0.1	-	±0.00001	±0.1	-	±1.0	μAdc
Input Current (CL/CP Device) Control	I <sub>in</sub>	15	-	±0.3	-	±0.00001	±0.3	-	±1.0	μAdc
Input Capacitance (V <sub>in</sub> = 0) Control Input: Switch Inputs	C <sub>in</sub>	10	-	-	-	5.0 8.0	7.5 15	-	-	pF
Output Capacitance	C <sub>out</sub>	10	-	-	-	8.0	-	-	-	
Feedthrough Capacitance	C <sub>in-out</sub>	10	-	-	-	0.5	-	-	-	pF
Quiescent Current (AL Device) (Per Package)	I <sub>Q</sub>	5.0	-	0.25	-	0.0005	0.25	-	7.5	μAdc
		10	-	0.50	-	0.0010	0.50	-	15	
		15	-	1.00	-	0.0015	1.00	-	30	
Quiescent Current (CL/CP Device) (Per Package)	I <sub>Q</sub>	5.0	-	1.0	-	0.0005	1.0	-	7.5	μAdc
		10	-	2.0	-	0.0010	2.0	-	15	
		15	-	4.0	-	0.0015	4.0	-	30	
ON Resistance (AL Device)	R <sub>ON</sub>	5.0	-	800	-	250	1050	-	1200	Ω
		10	-	400	-	120	500	-	520	
		15	-	220	-	80	280	-	300	
ON Resistance (CL/CP Device)	R <sub>ON</sub>	5.0	-	880	-	250	1050	-	1300	Ω
		10	-	450	-	120	500	-	550	
		15	-	250	-	80	280	-	320	
ΔON Resistance Between Any Two of Four Switches	ΔR <sub>ON</sub>	5.0	-	-	-	25	-	-	-	Ω
		10	-	-	-	10	-	-	-	
		15	-	-	-	5.0	-	-	-	
Input/Output Leakage Current Switch OFF (AL Device)	-	15	-	±100	-	±0.01	±100	-	±1000	nAdc
Input/Output Leakage Current Switch OFF (CL/CP Device)	-	15	-	±300	-	±0.01	±300	-	±1000	nAdc

<sup>a</sup>The formulas given are for the typical characteristics only.

T<sub>low</sub> = -55°C for AL Device, -40°C for CL/CP Device.

T<sub>high</sub> = +125°C for AL Device, +85°C for CL/CP Device.

This device contains circuitry to protect the inputs against damage due to high static voltages or electric fields; however, it is advised that normal precautions be taken to avoid application of any voltage higher than maximum rated voltages to this high impedance circuit. For proper operation it is recommended that V<sub>in</sub> and V<sub>out</sub> be constrained to the range V<sub>SS</sub> < (V<sub>in</sub> or V<sub>out</sub>) < V<sub>DD</sub>.

Unused inputs must always be tied to an appropriate logic voltage level (e.g., either V<sub>SS</sub> or V<sub>DD</sub>).

## MC14066B

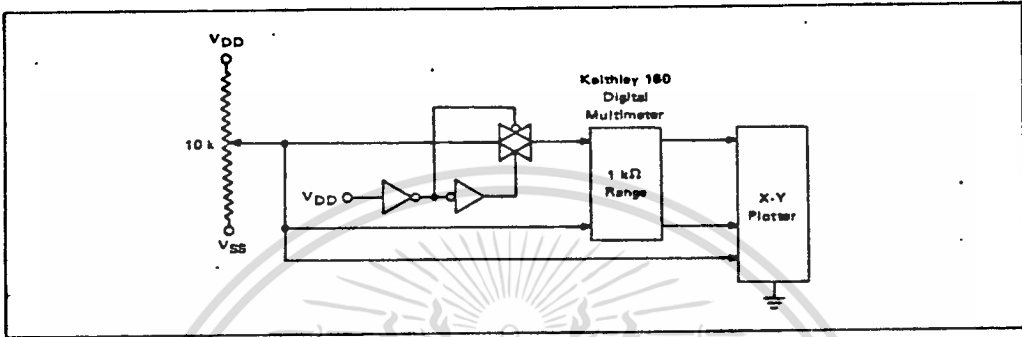
SWITCHING CHARACTERISTICS\* ( $C_L = 50$  pF,  $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	VDD Vdc	Min	Typ	Max	Unit
Propagation Delay Times $V_{SS} = 0$ Vdc						
Input to Output ( $R_L = 10$ k $\Omega$ )	t <sub>PLH</sub> , t <sub>PHL</sub>	5.0	—	20	40	ns
t <sub>PLH</sub> , t <sub>PHL</sub> = (0.17 ns/pF) C <sub>L</sub> + 15.5 ns						
t <sub>PLH</sub> , t <sub>PHL</sub> = (0.08 ns/pF) C <sub>L</sub> + 6.0 ns						
t <sub>PLH</sub> , t <sub>PHL</sub> = (0.06 ns/pF) C <sub>L</sub> + 4.0 ns						
Control to Output ( $R_L = 1$ k $\Omega$ )	t <sub>PHZ</sub>	5.0	—	40	80	ns
Output "1" to High Impedance						
Output "0" to High Impedance						
Output "0" to High Impedance	t <sub>PLZ</sub>	5.0	—	40	80	ns
Output "1" to High Impedance						
High Impedance to Output "1"						
High Impedance to Output "1"	t <sub>PZH</sub>	5.0	—	60	120	ns
Output "0" to High Impedance						
High Impedance to Output "0"						
High Impedance to Output "0"	t <sub>PZL</sub>	5.0	—	60	120	ns
Output "1" to High Impedance						
High Impedance to Output "1"						
Sine Wave Distortion ( $V_{in} = 1.77$ Vdc, RMS Centered @ 0.0 Vdc, $R_L = 10$ k $\Omega$ , $f = 1.0$ kHz)	—	5.0	—	0.1	—	%
Frequency Response (Switch ON)  ( $R_L = 1$ k $\Omega$ , 20 Log <sub>10</sub> $\frac{V_{out}}{V_{in}} = -3$ dB)	—	5.0	—	65	—	MHz
Feedthrough Attenuation (Switch OFF)  ( $R_L = 1$ k $\Omega$ , 20 Log <sub>10</sub> $\frac{V_{out}}{V_{in}} = -50$ dB)	—	5.0	—	1.0	—	MHz
Crosstalk Between Any Two Switches  ( $R_L = 1$ k $\Omega$ , 20 Log <sub>10</sub> $\frac{V_{out}(B)}{V_{in}(A)} = -50$ dB, (Switch A ON, Switch B OFF)	—	5.0	—	8.0	—	MHz
Crosstalk, Control Input to Signal Output	—	5.0	—	300	—	mV
Maximum Control Input Frequency  (20 Log <sub>10</sub> $\frac{V_{out}}{V_{ip}} = -6$ dB)	—	5.0	—	6.0	—	MHz
		10	—	8.0	—	
		15	—	8.5	—	

\*The formulas given are for the typical characteristics only.

MC14066B

FIGURE 7 - CHANNEL RESISTANCE ( $R_{ON}$ ) TEST CIRCUIT



TYPICAL RESISTANCE CHARACTERISTICS

FIGURE 8 -  $V_{DD} = 7.5 \text{ V}$ ,  $V_{SS} = -7.5 \text{ V}$

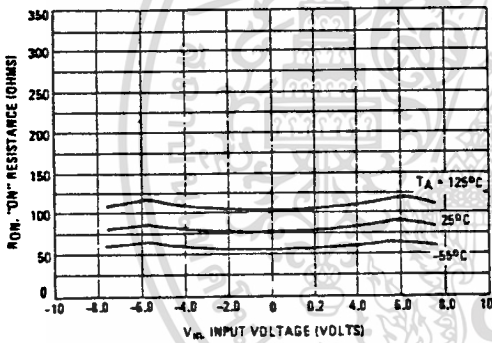


FIGURE 9 -  $V_{DD} = 5.0 \text{ V}$ ,  $V_{SS} = -5.0 \text{ V}$

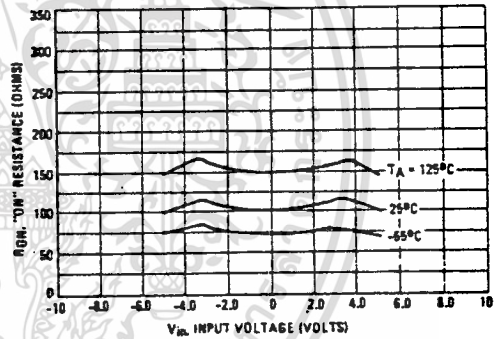


FIGURE 10 -  $V_{DD} = 2.5 \text{ V}$ ,  $V_{SS} = -2.5 \text{ V}$

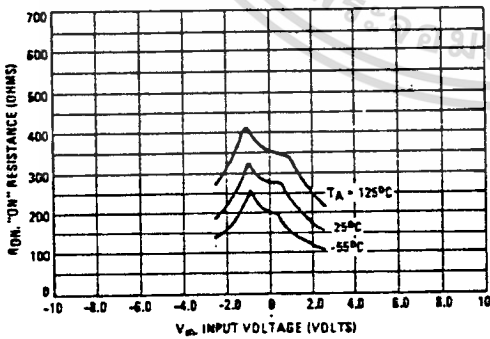
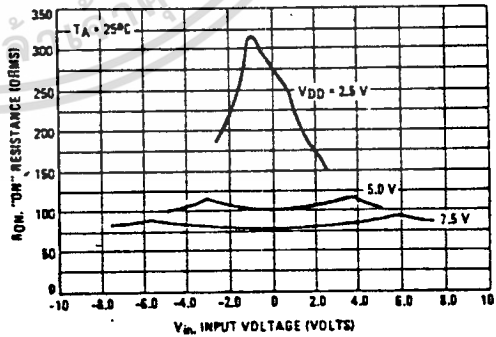


FIGURE 11 - COMPARISON AT 25°C,  $V_{DD} = -V_{SS}$



TEST CIRCUITS

FIGURE 1 - INPUT VOLTAGE

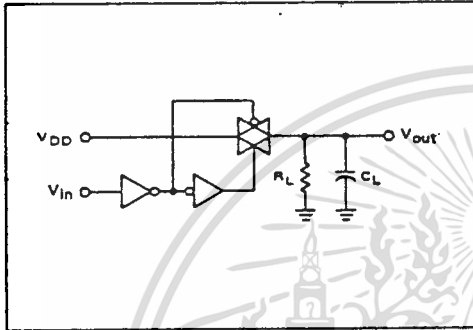


FIGURE 2 - PROPAGATION DELAY TIME, CONTROL TO OUTPUT

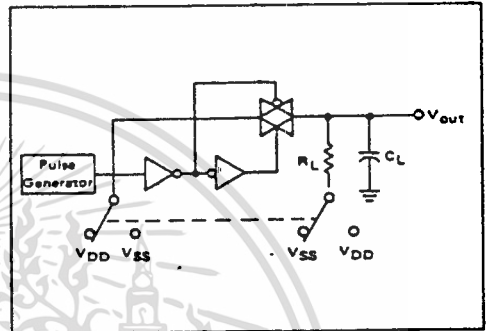


FIGURE 3 - BANDWIDTH AND FEEDTHROUGH ATTENUATION

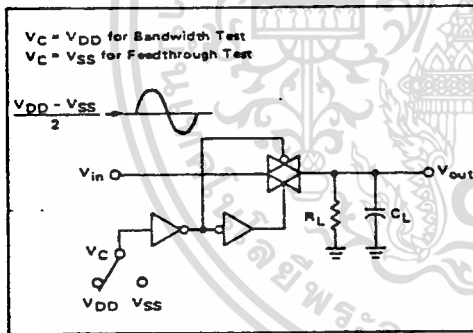


FIGURE 4 - CROSSTALK BETWEEN ANY TWO SWITCHES

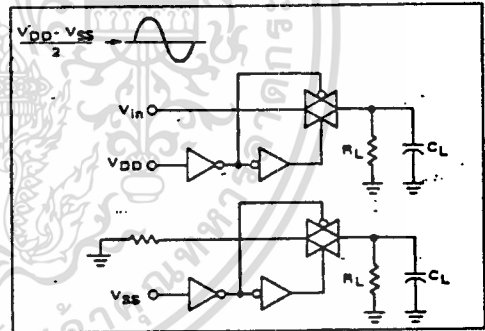


FIGURE 5 - CROSSTALK, CONTROL TO OUTPUT

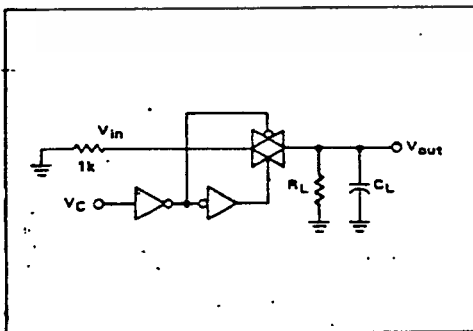
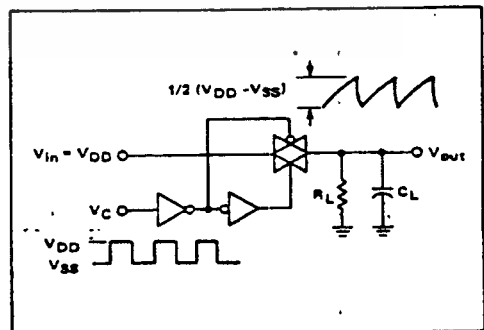


FIGURE 6 - MAXIMUM CONTROL FREQUENCY





**B-SUFFIX SERIES CMOS GATES**

The B Series logic gates are constructed with P and N channel enhancement mode devices in a single monolithic structure (Complementary MOS). Their primary use is where low power dissipation and/or high noise immunity is desired.

- Quiescent Current = 0.5 nA typ/pkg @ 5 Vdc
- Noise Immunity = 45% of V<sub>DD</sub> typ
- Supply Voltage Range = 3.0 Vdc to 18 Vdc
- All Outputs Buffered
- Capable of Driving Two Low-power TTL Loads, One Low-power Schottky TTL Load or Two HTL Loads Over the Rated Temperature Range.
- Double Diode Protection on All Inputs
- Pin-for-Pin Replacements for Corresponding CD4000 Series B Suffix Devices

**ORDERING INFORMATION**

MC14XXXB Suffix Denotes



**L SUFFIX  
CERAMIC PACKAGE  
CASE 632**

- L Ceramic Package
- P Plastic Package
- A Extended Operating Temperature Range
- C Limited Operating Temperature Range



**P SUFFIX  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 646**

**MAXIMUM RATINGS (Voltages referenced to V<sub>SS</sub>)**

Rating	Symbol	Value	Unit
DC Supply Voltage	V <sub>DD</sub>	-0.5 to +18	Vdc
Input Voltage, All Inputs	V <sub>in</sub>	-0.5 to V <sub>DD</sub> - 0.5	Vdc
DC Current Drain per Pin	I	10	mAdc
Operating Temperature Range - AL Device	T <sub>A</sub>	-55 to +125	°C
CL/CP Device		-40 to +85	
Storage Temperature Range	T <sub>stg</sub>	-65 to +150	°C

This device contains circuitry to protect the inputs against damage due to high static voltages or electric fields, however, it is advised that normal precautions be taken to avoid application of any voltage higher than maximum rated voltages to this high impedance circuit. For proper operation it is recommended that V<sub>in</sub> and V<sub>out</sub> be constrained to the range V<sub>SS</sub> < (V<sub>in</sub> or V<sub>out</sub>) < V<sub>DD</sub>.

Unused inputs must always be tied to an appropriate logic voltage level (e.g., either V<sub>SS</sub> or V<sub>DD</sub>).

**MC14001B**  
Quad 2-Input NOR Gate

**MC14002B**  
Dual 4-Input NOR Gate

**MC14011B**  
Quad 2-Input NAND Gate

**MC14012B**  
Dual 4-Input NAND Gate

**MC14023B**  
Triple 3-Input NAND Gate

**MC14025B**  
Triple 3-Input NOR Gate

**MC14068B**  
8-Input NAND Gate

**MC14071B**  
Quad 2-Input OR Gate

**MC14072B**  
Dual 4-Input OR Gate

**MC14073B**  
Triple 3-Input AND Gate

**MC14075B**  
Triple 3-Input OR Gate

**MC14078B**  
8-Input NOR Gate

**MC14081B**  
Quad 2-Input AND Gate

**MC14082B**  
Dual 4-Input AND Gate

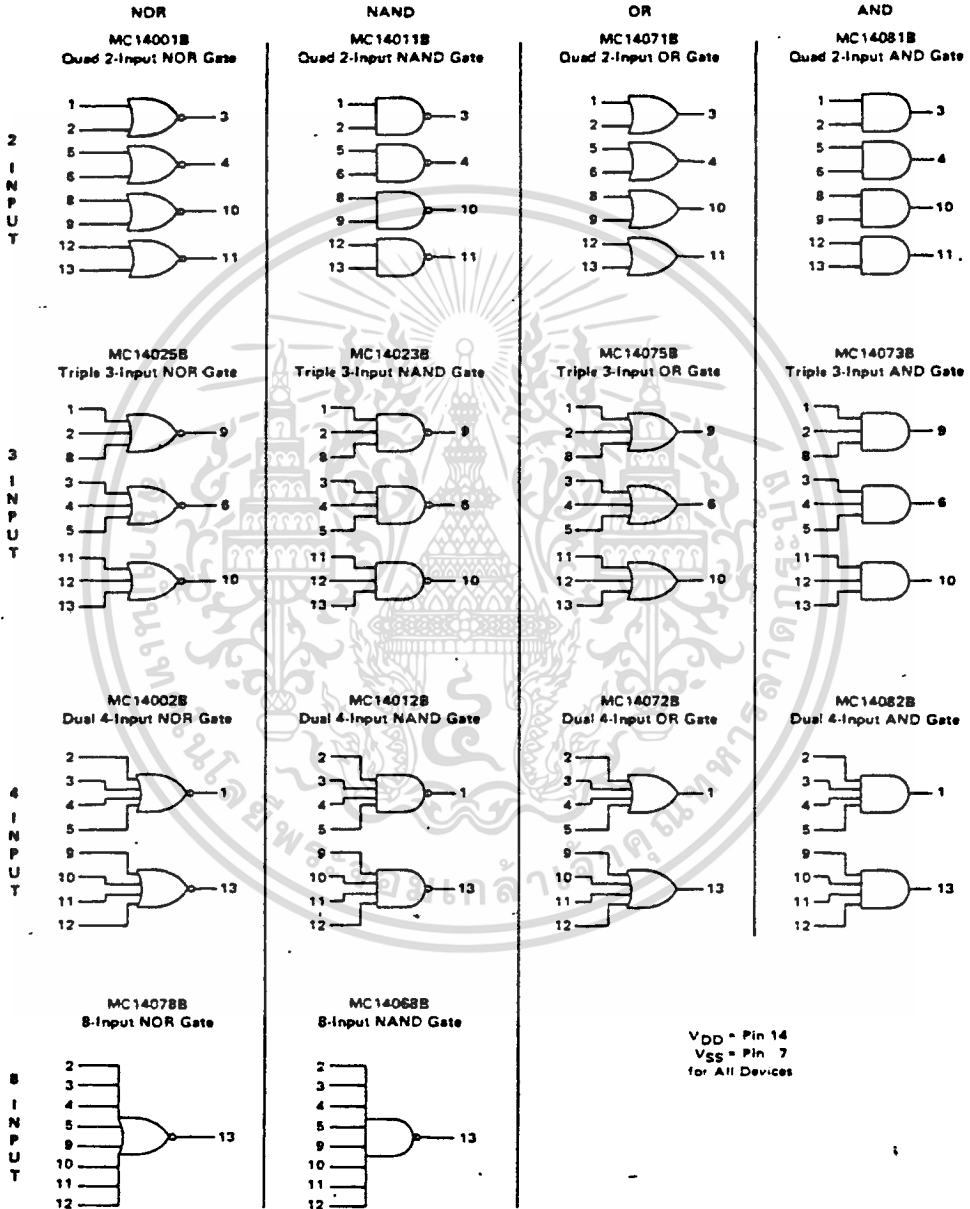
**CMOS SSI**

(LOW-POWER COMPLEMENTARY MOS)

**B-SERIES GATES**

CMOS B-SERIES GATES

LOGIC DIAGRAMS



## CMOS B-SERIES GATES

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	V <sub>DD</sub> Vdc	T <sub>low</sub> *		25°C			T <sub>high</sub> *		Unit	
			Min	Max	Min	Typ	Max	Min	Max		
Output Voltage "0" Level V <sub>in</sub> V <sub>DD</sub> or 0	V <sub>OL</sub>	5.0	-	0.05	-	0	0.05	-	0.05	Vdc	
		10	-	0.05	-	0	0.05	-	0.05		
		15	-	0.05	-	0	0.05	-	0.05		
"1" Level V <sub>in</sub> 0 or V <sub>DD</sub>	V <sub>OH</sub>	5.0	4.95	-	4.95	5.0	-	4.95	-	Vdc	
		10	9.95	-	9.95	10	-	9.95	-		
		15	14.95	-	14.95	15	-	14.95	-		
Input Voltage <sup>†</sup> (V <sub>O</sub> 4.5 or 0.5 Vdc) (V <sub>O</sub> 9.0 or 1.0 Vdc) (V <sub>O</sub> 13.5 or 1.5 Vdc)	"0" Level V <sub>IL</sub>	5.0	-	1.5	-	2.25	1.5	-	1.5	Vdc	
		10	-	3.0	-	4.50	3.0	-	3.0		
		15	-	4.0	-	6.75	4.0	-	4.0		
	"1" Level V <sub>IH</sub>	V <sub>IH</sub>	5.0	3.5	-	3.5	2.75	-	3.5	-	Vdc
			10	7.0	-	7.0	5.50	-	7.0	-	
			15	11.0	-	11.0	8.25	-	11.0	-	
Output Drive Current (AL Device) (V <sub>OH</sub> 2.5 Vdc) Source (V <sub>OH</sub> 4.6 Vdc) (V <sub>OH</sub> 9.5 Vdc) (V <sub>OH</sub> 13.5 Vdc) (V <sub>OL</sub> 0.4 Vdc) Sink (V <sub>OL</sub> 0.5 Vdc) (V <sub>OL</sub> 1.5 Vdc)	I <sub>OH</sub>	5.0	-3.0	-	-2.4	-4.2	-	-1.7	-	mA <sub>dc</sub>	
		10	-0.64	-	-0.51	-0.88	-	-0.36	-		
		15	-1.6	-	-1.3	-2.25	-	-0.9	-		
	I <sub>OL</sub>	I <sub>OL</sub>	5.0	0.64	-	0.51	0.88	-	0.36	-	mA <sub>dc</sub>
			10	1.6	-	1.3	2.25	-	0.9	-	
			15	4.2	-	3.4	8.8	-	2.4	-	
Output Drive Current (CL/CP Device) (V <sub>OH</sub> 2.5 Vdc) Source (V <sub>OH</sub> 4.6 Vdc) (V <sub>OH</sub> 9.5 Vdc) (V <sub>OH</sub> 13.5 Vdc) (V <sub>OL</sub> 0.4 Vdc) Sink (V <sub>OL</sub> 0.5 Vdc) (V <sub>OL</sub> 1.5 Vdc)	I <sub>OH</sub>	5.0	-2.5	-	-2.1	-4.2	-	-1.7	-	mA <sub>dc</sub>	
		10	-0.52	-	-0.44	-0.88	-	-0.36	-		
		15	-1.3	-	-1.1	-2.25	-	-0.9	-		
	I <sub>OL</sub>	I <sub>OL</sub>	5.0	0.52	-	0.44	0.88	-	0.36	-	mA <sub>dc</sub>
			10	1.3	-	1.1	2.25	-	0.9	-	
			15	3.6	-	3.0	8.8	-	2.4	-	
Input Current (AL Device)	I <sub>in</sub>	15	-	±0.1	-	±0.00001	±0.1	-	±1.0	μA <sub>dc</sub>	
Input Current (CL/CP Device)	I <sub>in</sub>	15	-	±0.3	-	±0.00001	±0.3	-	±1.0	μA <sub>dc</sub>	
Input Capacitance (V <sub>in</sub> = 0)	C <sub>in</sub>	-	-	-	-	5.0	7.5	-	-	pF	
Quiescent Current (AL Device) (Per Package)	I <sub>DD</sub>	5.0	-	0.25	-	0.0005	0.25	-	7.5	μA <sub>dc</sub>	
		10	-	0.50	-	0.0010	0.50	-	15.0		
		15	-	1.00	-	0.0015	1.00	-	30.0		
Quiescent Current (CL/CP Device) (Per Package)	I <sub>DD</sub>	5.0	-	1.0	-	0.0005	1.0	-	7.5	μA <sub>dc</sub>	
		10	-	2.0	-	0.0010	2.0	-	15.0		
		15	-	4.0	-	0.0015	4.0	-	30.0		
Total Supply Current <sup>††</sup> (Dynamic plus Quiescent, Per Gate, C <sub>L</sub> = 50 pF)	I <sub>T</sub>	5.0	I <sub>T</sub> = (0.3 μA/kHz) f + I <sub>DD</sub> /N							μA <sub>dc</sub>	
		10	I <sub>T</sub> = (0.6 μA/kHz) f + I <sub>DD</sub> /N								
		15	I <sub>T</sub> = (0.9 μA/kHz) f + I <sub>DD</sub> /N								

\*T<sub>low</sub> = -55°C for AL Device, -40°C for CL/CP Device.

T<sub>high</sub> = +125°C for AL Device, +85°C for CL/CP Device.

†Noise immunity specified for worst case input combination.

Noise Margin for both "1" and "0" level = 1.0 Vdc min @ V<sub>DD</sub> = 5.0 Vdc

2.0 Vdc min @ V<sub>DD</sub> = 10 Vdc

2.5 Vdc min @ V<sub>DD</sub> = 15 Vdc

††To calculate total supply current at loads other than 50 pF:

$$I_T(C_L) = I_T(50 \text{ pF}) + N \times 10^{-3} (C_L - 50) V_{DD} f$$

where: I<sub>T</sub> is in μA (per package), C<sub>L</sub> in pF, V<sub>DD</sub> in Vdc, f in kHz is input frequency and N is number of gates per package.

\*\*The formulas given are for the typical characteristics only at 25°C.

# CMOS B-SERIES GATES

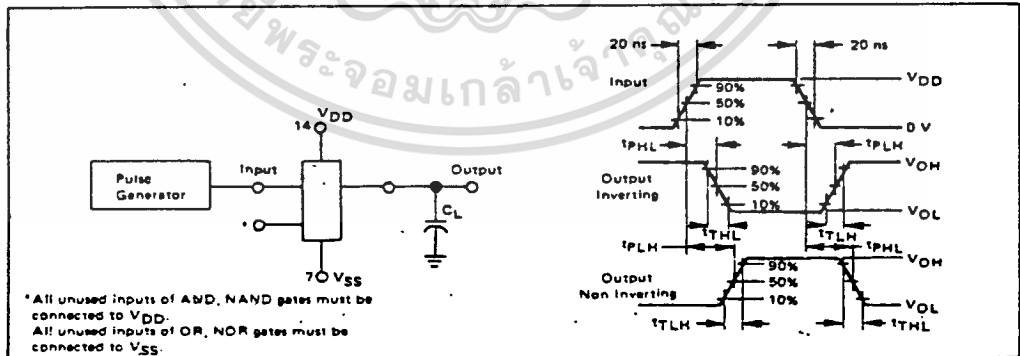
## B-SERIES GATE SWITCHING TIMES

SWITCHING CHARACTERISTICS\* (C<sub>L</sub> = 50 pF, T<sub>A</sub> = 25°C)

Characteristic	Symbol	V <sub>DD</sub> Vdc	Min	Typ	Max	Unit
Output Rise Time, All B-Series Gates $t_{TLH} = (1.35 \text{ ns/pF}) C_L + 33 \text{ ns}$ $t_{TLH} = (0.60 \text{ ns/pF}) C_L + 20 \text{ ns}$ $t_{TLH} = (0.40 \text{ ns/pF}) C_L + 20 \text{ ns}$	t <sub>TLH</sub>	5.0	—	100	200	ns
		10	—	50	100	
		15	—	40	80	
Output Fall Time, All B-Series Gates $t_{TFL} = (1.35 \text{ ns/pF}) C_L + 33 \text{ ns}$ $t_{TFL} = (0.60 \text{ ns/pF}) C_L + 20 \text{ ns}$ $t_{TFL} = (0.40 \text{ ns/pF}) C_L + 20 \text{ ns}$	t <sub>TFL</sub>	5.0	—	100	200	ns
		10	—	50	100	
		15	—	40	80	
Propagation Delay Time MC14001B, MC14011B only $t_{PLH}, t_{PHL} = (0.90 \text{ ns/pF}) C_L + 80 \text{ ns}$ $t_{PLH}, t_{PHL} = (0.36 \text{ ns/pF}) C_L + 32 \text{ ns}$ $t_{PLH}, t_{PHL} = (0.26 \text{ ns/pF}) C_L + 27 \text{ ns}$ All Other 2, 3, and 4 Input Gates $t_{PLH}, t_{PHL} = (0.90 \text{ ns/pF}) C_L + 115 \text{ ns}$ $t_{PLH}, t_{PHL} = (0.36 \text{ ns/pF}) C_L + 47 \text{ ns}$ $t_{PLH}, t_{PHL} = (0.26 \text{ ns/pF}) C_L + 37 \text{ ns}$ 8-Input Gates (MC14068B, MC14078B) $t_{PLH}, t_{PHL} = (0.90 \text{ ns/pF}) C_L + 155 \text{ ns}$ $t_{PLH}, t_{PHL} = (0.36 \text{ ns/pF}) C_L + 62 \text{ ns}$ $t_{PLH}, t_{PHL} = (0.26 \text{ ns/pF}) C_L + 47 \text{ ns}$	t <sub>PLH</sub> , t <sub>PHL</sub>	5.0	—	125	250	ns
		10	—	50	100	
		15	—	40	80	
		5.0	—	160	300	
		10	—	65	130	
		15	—	50	100	
		5.0	—	200	350	
		10	—	80	150	
		15	—	60	110	

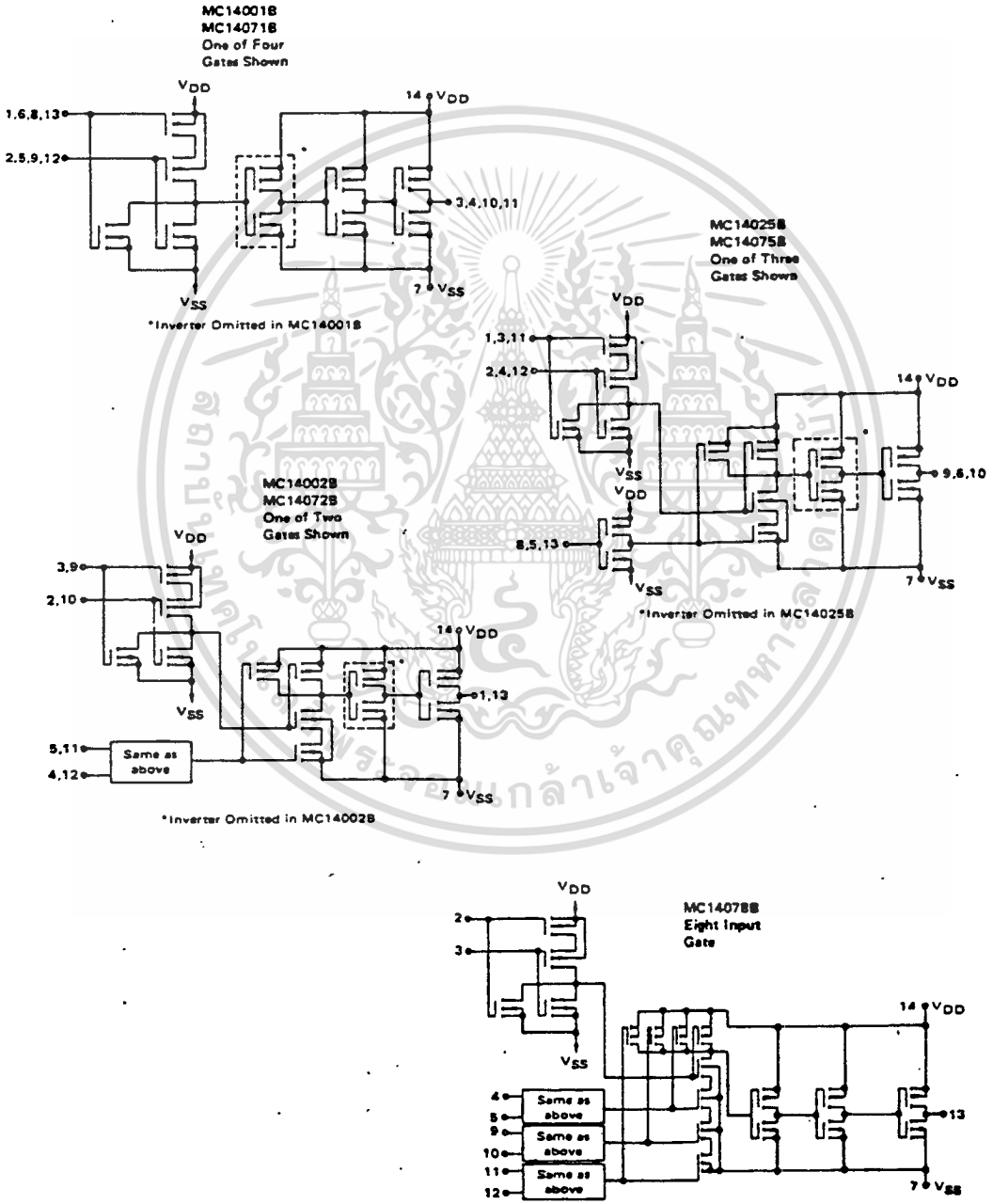
\*The formulas given are for the typical characteristics only.

FIGURE 1 - SWITCHING TIME TEST CIRCUIT AND WAVEFORMS



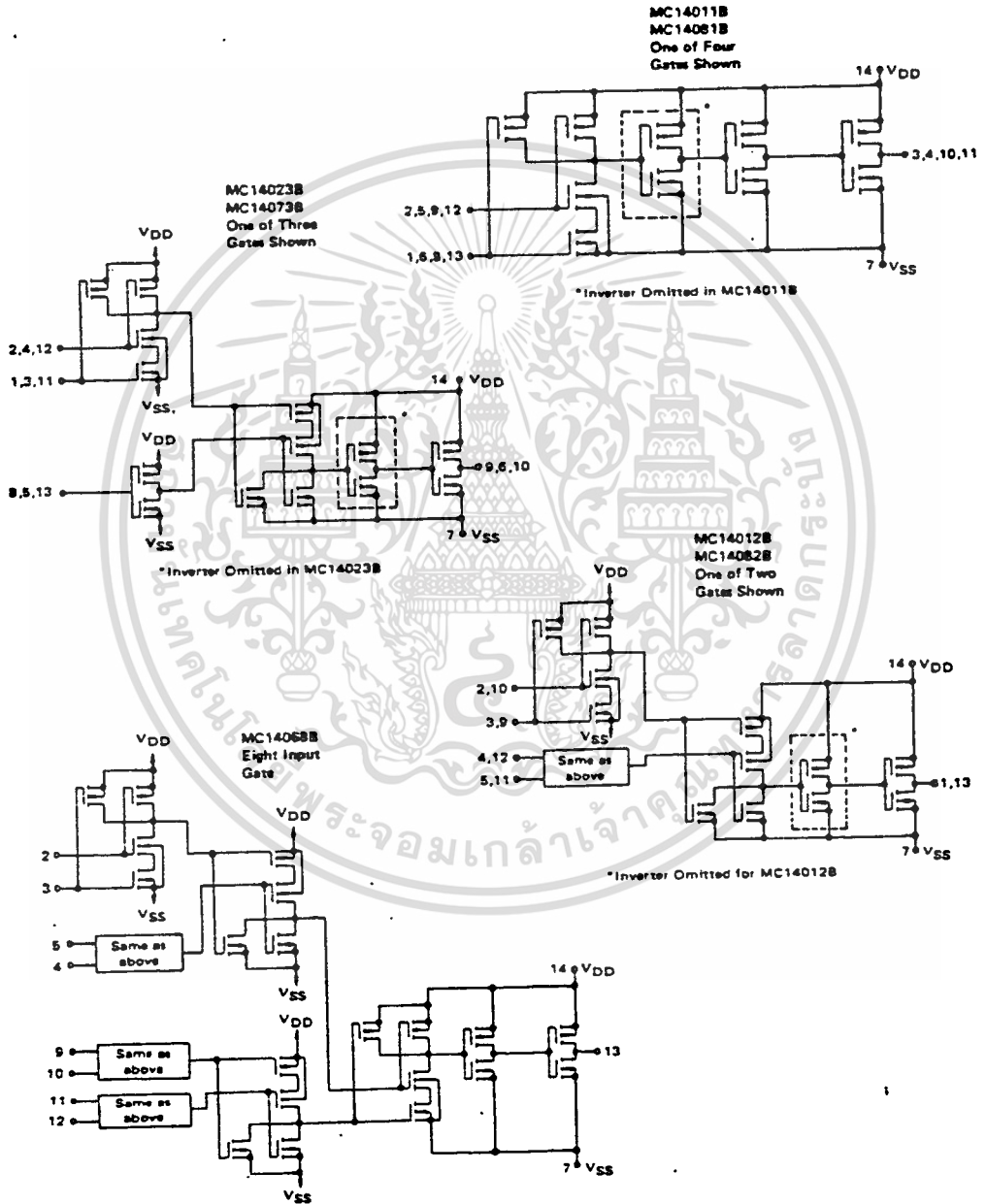
CMOS B-SERIES GATES

CIRCUIT SCHEMATIC  
NOR, OR Gates



CMOS B-SERIES GATES

CIRCUIT SCHEMATICS  
NAND, AND Gates



CMOS B-SERIES GATES

TYPICAL B-SERIES GATE CHARACTERISTICS

N-CHANNEL DRAIN CURRENT (SINK)

FIGURE 2 -  $V_{GS} = 5.0 \text{ Vdc}$

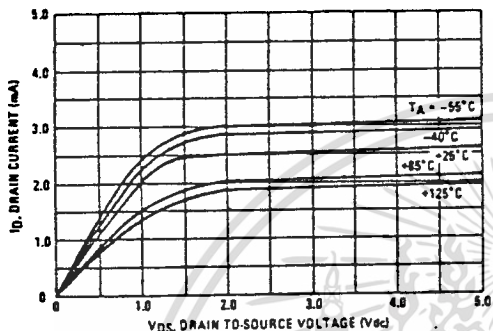


FIGURE 4 -  $V_{GS} = 10 \text{ Vdc}$

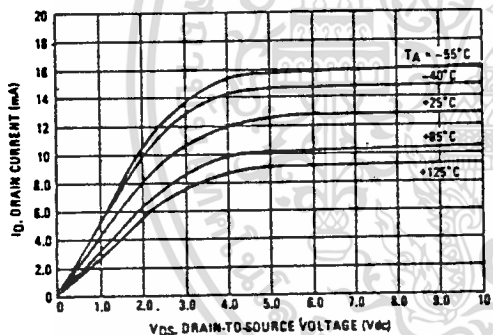
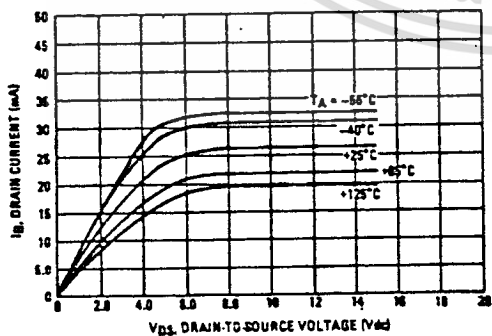


FIGURE 6 -  $V_{GS} = 15 \text{ Vdc}$



P-CHANNEL DRAIN CURRENT (SOURCE)

FIGURE 3 -  $V_{GS} = -5.0 \text{ Vdc}$

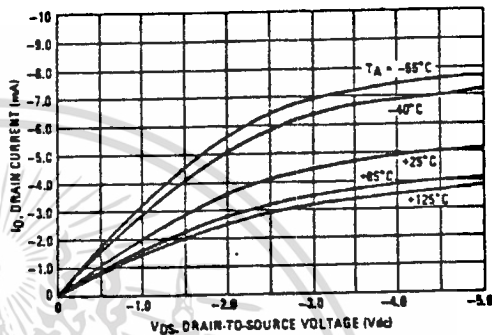


FIGURE 5 -  $V_{GS} = -10 \text{ Vdc}$

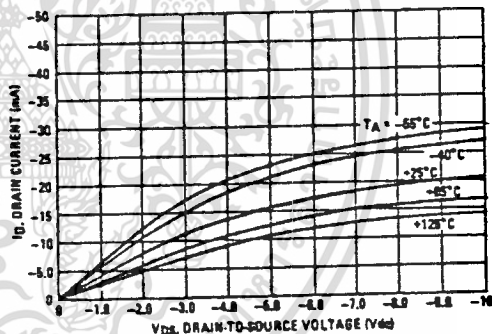
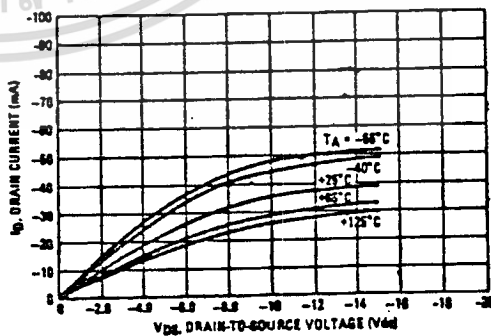


FIGURE 7 -  $V_{GS} = -15 \text{ Vdc}$



CMOS B-SERIES GATES

TYPICAL B-SERIES GATE CHARACTERISTICS (cont'd)

VOLTAGE TRANSFER CHARACTERISTICS

FIGURE 8 -  $V_{DD} = 5.0$  Vdc

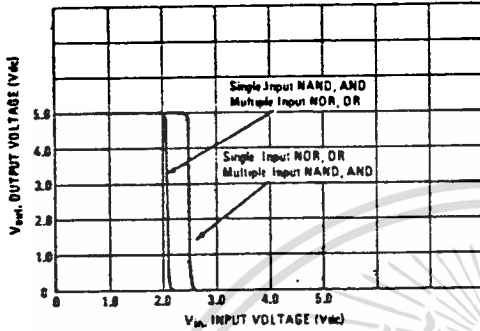


FIGURE 9 -  $V_{DD} = 10$  Vdc

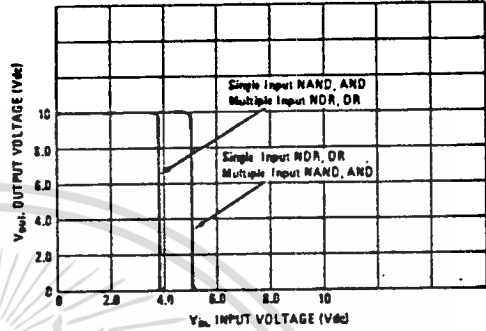
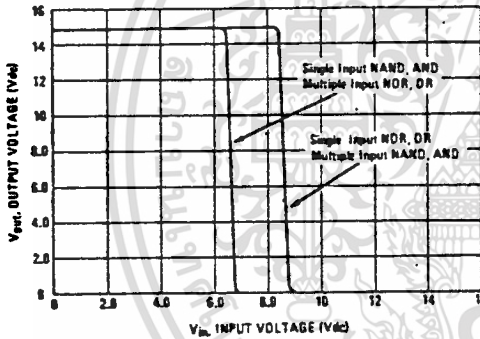


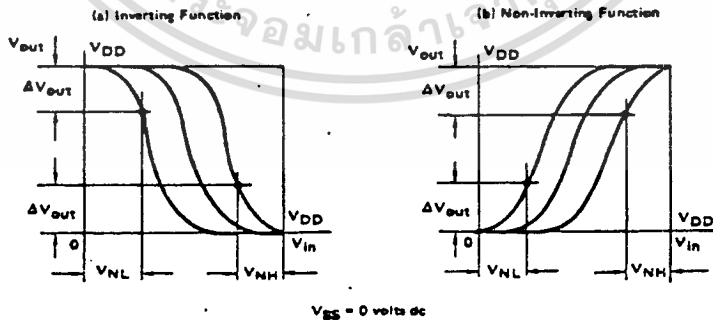
FIGURE 10 -  $V_{DD} = 15$  Vdc



DC NOISE IMMUNITY ( $V_{NL}$  AND  $V_{NH}$ )

The dc noise immunity is defined as the input voltage range from an ideal "1" or "0" input level (assuming the previous CMOS driving state is unloaded which does not produce output state (combination) change(s)). The typical and limit values of the input ranges  $V_{NL}$  and  $V_{NH}$  for the output to stay within a range  $\Delta V_{out}$  from either  $V_{DD}$  or  $V_{SS}$  are given in the Electrical Characteristics table. The definitions of  $V_{NL}$ ,  $V_{NH}$ , and  $\Delta V_{out}$  are illustrated in Figure 11 for inverting and non-inverting functions.

FIGURE 11 - DC NOISE IMMUNITY



$V_{SS} = 0$  volts dc

For complete data sheet, including Operation and Applications Information, contact:  
 Literature Distribution Center  
 P.O. Box 20912  
 Phoenix, Arizona 85036

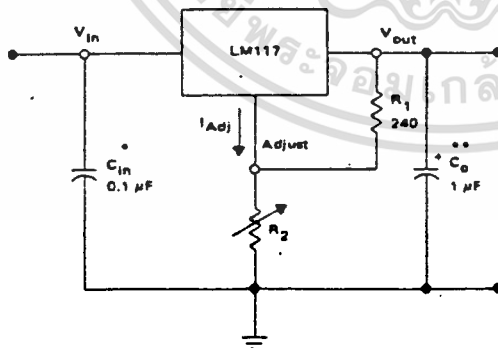
### 3-TERMINAL ADJUSTABLE OUTPUT POSITIVE VOLTAGE REGULATOR

The LM117/217/317 are adjustable 3-terminal positive voltage regulators capable of supplying in excess of 1.5 A over an output voltage range of 1.2 V to 37 V. These voltage regulators are exceptionally easy to use and require only two external resistors to set the output voltage. Further, they employ internal current limiting, thermal shutdown and safe area compensation, making them essentially blow-out proof.

The LM117 series serve a wide variety of applications including local, on card regulation. This device also makes an especially simple adjustable switching regulator, a programmable output regulator, or by connecting a fixed resistor between the adjustment and output, the LM117 series can be used as a precision current regulator.

- Output Current in Excess of 1.5 Amperes in TO-3 and TO-220 Packages
- Output Current in Excess of 0.5 Ampere in TO-39 Package
- Output Adjustable between 1.2 V and 37 V
- Internal Thermal Overload Protection
- Internal Short-Circuit Current Limiting Constant with Temperature
- Output Transistor Safe-area Compensation
- Floating Operation for High Voltage Applications
- Standard 3-lead Transistor Packages
- Eliminates Stocking Many Fixed Voltages

#### STANDARD APPLICATION



- \* -  $C_{in}$  is required if regulator is located an appreciable distance from power supply filter.
- \*\* -  $C_o$  is not needed for stability, however it does improve transient response.

$$V_{out} = 1.25 V \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{Adj} R_2$$

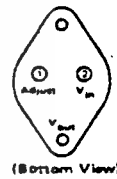
Since  $I_{Adj}$  is controlled to less than 100  $\mu A$ , the error associated with this term is negligible in most applications

LM117  
 LM217  
 LM317

### 3-TERMINAL ADJUSTABLE POSITIVE VOLTAGE REGULATOR

SILICON MONOLITHIC INTEGRATED CIRCUIT

K SUFFIX  
 METAL PACKAGE  
 CASE 1<sup>†</sup>  
 (TO-3 Type)



(Bottom View)

Pin 1 and 2 electrically isolated from case. Case is third electrical connection.

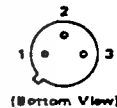
T SUFFIX  
 PLASTIC PACKAGE  
 CASE 221A  
 (TO-220)



Pin 1 Adjust  
 Pin 2 Vout  
 Pin 3 Vin

Heat sink surface connected to Pin 2

H SUFFIX  
 METAL PACKAGE  
 CASE 7B  
 (TO-39)



(Bottom View)

(Case is output)



Pin 1 Vin  
 Pin 2 Adjust  
 Pin 3 Vout

#### ORDERING INFORMATION

Device	Temperature Range	Package
LM117H	$T_J = -55^{\circ}C$ to $+150^{\circ}C$	Metal Can
LM117K	$T_J = -55^{\circ}C$ to $+150^{\circ}C$	Metal Power
LM217H	$T_J = -25^{\circ}C$ to $+150^{\circ}C$	Metal Can
LM217K	$T_J = -25^{\circ}C$ to $+150^{\circ}C$	Metal Power
LM317H	$T_J = 0^{\circ}C$ to $+125^{\circ}C$	Metal Can
LM317K	$T_J = 0^{\circ}C$ to $+125^{\circ}C$	Metal Power
LM317T	$T_J = 0^{\circ}C$ to $+125^{\circ}C$	Plastic Power

## LM117, LM217, LM317 (continued)

## MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Input-Output Voltage Differential	$V_I - V_O$	40	Vdc
Power Dissipation	$P_D$	Internally Limited	
Operating Junction Temperature Range LM117 LM217 LM317	$T_J$	-65 to +150 -25 to +150 0 to +125	°C
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-65 to +150	°C

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $V_I - V_O = 5\text{ V}$ ;  $I_O = 0.5\text{ A}$  for K and T packages;  $I_O = 0.1\text{ A}$  for H package;  
 $T_J = T_{low}$  to  $T_{high}$  [see Note 1];  $I_{max}$  and  $P_{max}$  per Note 2; unless otherwise specified.)

Characteristic	Symbol	LM117/217			LM317			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Line Regulation (Note 3) $T_A = 25^\circ\text{C}$ , $3\text{ V} < V_I - V_O < 40\text{ V}$	Reg <sub>line</sub>	—	0.01	0.02	—	0.01	0.04	%/V
Load Regulation (Note 3) $T_A = 25^\circ\text{C}$ , $10\text{ mA} < I_O < I_{max}$ $V_O < 5\text{ V}$ $V_O > 5\text{ V}$	Reg <sub>load</sub>	—	5	15	—	5	25	mV % $V_O$
Adjustment Pin Current	$I_{Adj}$	—	50	100	—	50	100	$\mu\text{A}$
Adjustment Pin Current Change $2.5\text{ V} < V_I - V_O < 40\text{ V}$ $10\text{ mA} < I_L < I_{max}$ , $P_D < P_{max}$	$\Delta I_{Adj}$	—	0.2	5	—	0.2	5	$\mu\text{A}$
Reference Voltage (Note 4) $3\text{ V} < V_I - V_O < 40\text{ V}$ $10\text{ mA} < I_O < I_{max}$ , $P_D < P_{max}$	$V_{ref}$	1.20	1.25	1.30	1.20	1.25	1.30	V
Line Regulation (Note 3) $3\text{ V} < V_I - V_O < 40\text{ V}$	Reg <sub>line</sub>	—	0.02	0.05	—	0.02	0.07	%/V
Load Regulation (Note 3) $10\text{ mA} < I_O < I_{max}$ $V_O < 5\text{ V}$ $V_O > 5\text{ V}$	Reg <sub>load</sub>	—	20	50	—	20	70	mV % $V_O$
Temperature Stability ( $T_{low} < T_J < T_{high}$ )	$T_S$	—	0.7	—	—	0.7	—	% $V_O$
Minimum Load Current to Maintain Regulation ( $V_I - V_O = 40\text{ V}$ )	$I_{Lmin}$	—	3.5	5	—	3.5	10	mA
Maximum Output Current $V_I - V_O < 15\text{ V}$ , $P_D < P_{max}$ K and T Packages H Package $V_I - V_O = 40\text{ V}$ , $P_D < P_{max}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ K and T Packages H Package	$I_{max}$	1.5 0.5	2.2 0.8	—	1.5 0.5	2.2 0.8	—	A
RMS Noise, % of $V_O$ $T_A = 25^\circ\text{C}$ , $10\text{ Hz} < f < 10\text{ KHz}$	N	—	0.003	—	—	0.003	—	% $V_O$
Ripple Rejection, $V_O = 10\text{ V}$ , $f = 120\text{ Hz}$ (Note 5) Without $C_{ADJ}$ $C_{ADJ} = 10\text{ }\mu\text{F}$	RR	— 66	65 80	—	— 66	65 80	—	dB
Long Term Stability, $T_J = T_{high}$ (Note 6) $T_A = 25^\circ\text{C}$ for Endpoint Measurements	S	—	0.3	1	—	0.3	1	%/1.0k Hrs
Thermal Resistance Junction to Case H Package (TO-39) K Package (TO-3) T Package (TO-220)	$R_{\theta JC}$	—	12 2.3	15 3	—	12 2.3	15 3	°C/W

NOTES: (1)  $T_{low} = -65^\circ\text{C}$  for LM117  $T_{high} = +150^\circ\text{C}$  for LM117  
 $-25^\circ\text{C}$  for LM217  $+150^\circ\text{C}$  for LM217  
 $0^\circ\text{C}$  for LM317  $+125^\circ\text{C}$  for LM317

(2)  $I_{max} = 1.5\text{ A}$  for K (TO-3) and T (TO-220) Packages  
 $= 0.5\text{ A}$  for H (TO-39) Package  
 $P_{max} = 20\text{ W}$  for K (TO-3) and T (TO-220) Packages  
 $= 2\text{ W}$  for H (TO-39) Package

(3) Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in  $V_O$  due to heating

effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

(4) Selected devices with tightened tolerance reference voltage available.

(5)  $C_{ADJ}$ , when used, is connected between the adjustment pin and ground.

(6) Since Long Term Stability cannot be measured on each device before shipment, this specification is an engineering estimate of average stability from lot to lot.

# LM117, LM217, LM317 (continued)

## APPLICATIONS INFORMATION

### BASIC CIRCUIT OPERATION

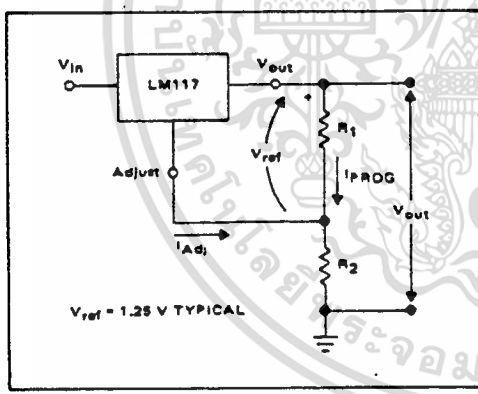
The LM117 is a 3-terminal floating regulator. In operation, the LM117 develops and maintains a nominal 1.25 volt reference ( $V_{ref}$ ) between its output and adjustment terminals. This reference voltage is converted to a programming current ( $I_{prog}$ ) by  $R_1$  (see Figure 1), and this constant current flows through  $R_2$  to ground. The regulated output voltage is given by:

$$V_{out} = V_{ref} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{Adj} R_2$$

Since the current from the adjustment terminal ( $I_{Adj}$ ) represents an error term in the equation, the LM117 was designed to control  $I_{Adj}$  to less than 100  $\mu A$  and keep it constant. To do this, all quiescent operating current is returned to the output terminal. This imposes the requirement for a minimum load current. If the load current is less than this minimum, the output voltage will rise.

Since the LM117 is a floating regulator, it is only the voltage differential across the circuit which is important to performance, and operation at high voltages with respect to ground is possible.

FIGURE 1 - BASIC CIRCUIT CONFIGURATION



### LOAD REGULATION

The LM117 is capable of providing extremely good load regulation, but a few precautions are needed to obtain maximum performance. For best performance, the programming resistor ( $R_1$ ) should be connected as close to the regulator as possible to minimize line drops which effectively appear in series with the reference, thereby degrading regulation. The ground end of  $R_2$  can be returned near the load ground to provide remote ground sensing and improve load regulation.

### EXTERNAL CAPACITORS

A 0.1  $\mu F$  disc or 1  $\mu F$  tantalum input bypass capacitor ( $C_{in}$ ) is recommended to reduce the sensitivity to input line impedance.

The adjustment terminal may be bypassed to ground to improve ripple rejection. This capacitor ( $C_{ADJ}$ ) prevents ripple from being amplified as the output voltage is increased. A 10  $\mu F$  capacitor should improve ripple rejection about 15dB at 120 Hz in a 10 volt application.

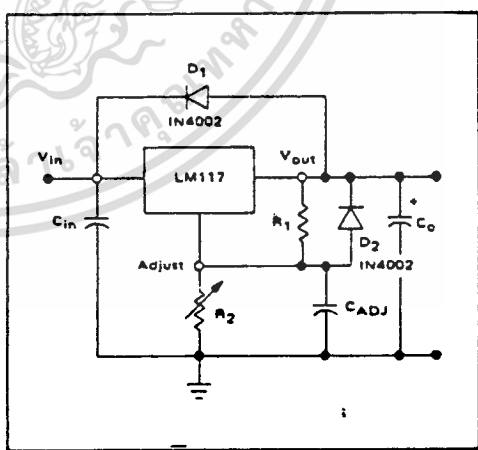
Although the LM117 is stable with no output capacitance, like any feedback circuit, certain values of external capacitance can cause excessive ringing. An output capacitance ( $C_o$ ) in the form of a 1  $\mu F$  aluminum electrolytic capacitor on the output swamps this effect and insures stability.

### PROTECTION DIODES

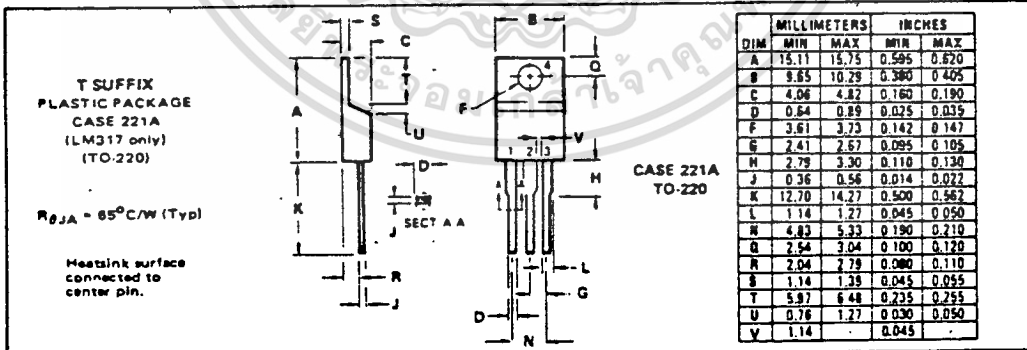
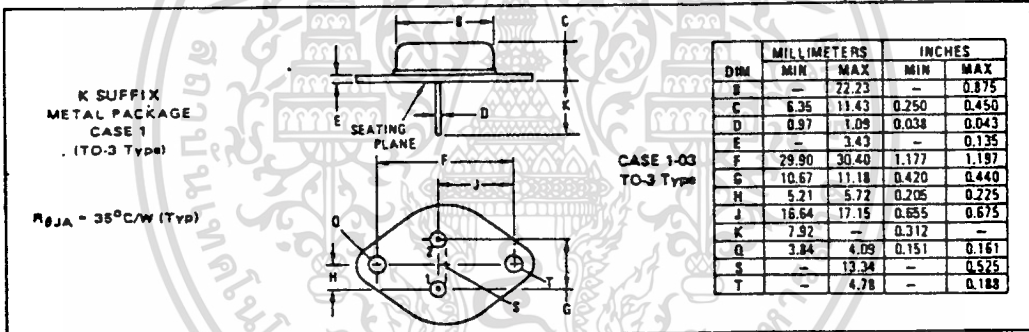
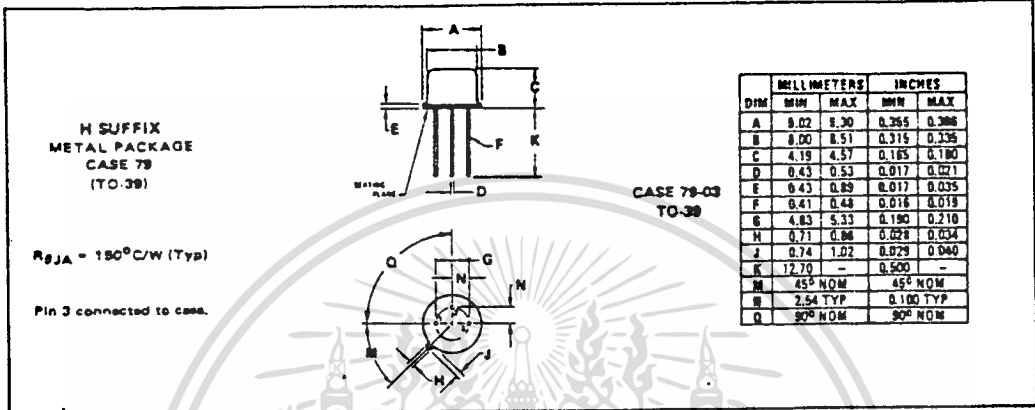
When external capacitors are used with any I.C. regulator it is sometimes necessary to add protection diodes to prevent the capacitors from discharging through low current points into the regulator.

Figure 2 shows the LM117 with the recommended protection diodes for output voltages in excess of 25 V or high capacitance values ( $C_o > 25 \mu F$ ,  $C_{ADJ} > 10 \mu F$ ). Diode  $D_1$  prevents  $C_o$  from discharging thru the I.C. during an input short circuit. Diode  $D_2$  protects against capacitor  $C_{ADJ}$  discharging through the I.C. during an output short circuit. The combination of diodes  $D_1$  and  $D_2$  prevents  $C_{ADJ}$  from discharging through the I.C. during an input short circuit.

FIGURE 2 - VOLTAGE REGULATOR WITH PROTECTION DIODES



## LM117, LM217, LM317 (continued)



## THERMAL INFORMATION

The maximum power consumption an integrated circuit can tolerate at a given operating ambient temperature, can be found from the equation:

$$P_{D(T_A)} = \frac{T_{J(max)} - T_A}{R_{\theta JA}(Typ)} \geq V_I I_S \cdot V_O I_O$$

Where:  $P_{D(T_A)}$  = Power Dissipation allowable at a given operating ambient temperature.

$T_{J(max)}$  = Maximum Operating Junction Temperature as listed in the Maximum Ratings Section

$T_A$  = Maximum Desired Operating Ambient Temperature

$R_{\theta JA}(Typ)$  = Typical Thermal Resistance Junction to Ambient

$I_S$  = Total Supply Current



# 4.3 INCH SEVEN SEGMENT DISPLAYS

HIGH EFFICIENCY RED - 5082-7650 SERIES  
 YELLOW - 5082-7660 SERIES  
 GREEN - 5082-7670 SERIES

TECHNICAL DATA APRIL 1979

## Features

- **LARGE DIGIT**  
Viewing up to 6 meters (19.7 feet)
- **CHOICE OF 3 BRIGHT COLORS**  
High Efficiency Red  
Yellow  
Green
- **LOW CURRENT OPERATION**  
As Low as 3mA per Segment  
Designed for Multiplex Operation
- **EXCELLENT CHARACTER APPEARANCE**  
Evenly Lighted Segments  
Wide Viewing Angle  
Body Color Improves "Off" Segment Contrast
- **EASY MOUNTING ON PC BOARD OR SOCKETS**  
Industry Standard 7.62mm (.3") DIP  
Leads on 2.54mm (.1") Centers
- **CATEGORIZED FOR LUMINOUS INTENSITY**  
Assures Uniformity of Light Output from Unit to Unit within a Single Category
- **IC COMPATIBLE**
- **MECHANICALLY RUGGED**



## Description

The 5082-7650, -7660, and -7670 series are large 10.92mm (.43 in.) Red, Yellow, and Green seven segment displays. These displays are designed for use in instruments, point of sale terminals, clocks, and appliances.

The -7650 and -7660 series devices utilize high efficiency LED chips which are made from GaAsP on a transparent GaP substrate.

The -7670 series devices utilize chips made from GaP on a transparent GaP substrate.

## Devices

Part No. 5082-	Color	Description	Package Drawing
-7650	High Efficiency Red	Common Anode Left Hand Decimal	A
-7651	High Efficiency Red	Common Anode Right Hand Decimal	B
-7653	High Efficiency Red	Common Cathode Right Hand Decimal	C
-7658	High Efficiency Red	Universal Overflow ±1 Right Hand Decimal	D
-7660	Yellow	Common Anode Left Hand Decimal	A
-7661	Yellow	Common Anode Right Hand Decimal	B
-7663	Yellow	Common Cathode Right Hand Decimal	C
-7668	Yellow	Universal Overflow ±1 Right Hand Decimal	D
-7670	Green	Common Anode Left Hand Decimal	A
-7671	Green	Common Anode Right Hand Decimal	B
-7673	Green	Common Cathode Right Hand Decimal	C
-7676	Green	Universal Overflow ±1 Right Hand Decimal	D

Note: Universal pinout brings the anode and cathode of each segment's LED out to separate pins - see internal diagram D.



Electrical/Optical Characteristics at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ 

## HIGH EFFICIENCY RED 5082-7650/-7651/-7653/-7656

Parameter	Symbol	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Units
Luminous Intensity/Segment <sup>(5,6)</sup> (Digit Average)	$I_A$	5mA D.C.	195	300		$\mu\text{cd}$
		20mA D.C.		1720		$\mu\text{cd}$
		60mA Pk: 1 of 6 Duty Factor		870		$\mu\text{cd}$
Peak Wavelength	$\lambda_{\text{peak}}$			635		nm
Dominant Wavelength <sup>(6)</sup>	$\lambda_d$			628		nm
Forward Voltage/Segment or D.P.	$V_F$	$I_F = 5\text{mA}$		1.7		V
		$I_F = 20\text{mA}$		2.0	2.5	V
		$I_F = 60\text{mA}$		2.6		V
Reverse Current/Segment or D.P.	$I_R$	$V_R = 0\text{V}$		10		$\mu\text{A}$
Response Time <sup>(7)</sup>	$t_r, t_f$			80		ns
Temperature Coefficient of $V_F$ /Segment or D.P.	$\Delta V_F/^\circ\text{C}$			-2.0		mV/°C

## YELLOW 5082-7660/-7661/-7663/-7666

Parameter	Symbol	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Units
Luminous Intensity/Segment <sup>(5,6)</sup> (Digit Average)	$I_A$	5mA D.C.	160	250		$\mu\text{cd}$
		20mA D.C.		1500		$\mu\text{cd}$
		60mA Pk: 1 of 6 Duty Factor		925		$\mu\text{cd}$
Peak Wavelength	$\lambda_{\text{peak}}$			563		nm
Dominant Wavelength <sup>(6)</sup>	$\lambda_d$			565		nm
Forward Voltage/Segment or D.P.	$V_F$	$I_F = 5\text{mA}$		1.8		V
		$I_F = 20\text{mA}$		2.2	2.5	V
		$I_F = 60\text{mA}$		3.1		V
Reverse Current/Segment or D.P.	$I_R$	$V_R = 0\text{V}$				$\mu\text{A}$
Response Time <sup>(7)</sup>	$t_r, t_f$			60		ns
Temperature Coefficient of $V_F$ /Segment or D.P.	$\Delta V_F/^\circ\text{C}$			-2.0		mV/°C

## GREEN 5082-7670/-7671/-7673/-7676

Parameter	Symbol	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Units
Luminous Intensity/Segment <sup>(5,6)</sup> (Digit Average)	$I_A$	10mA D.C.	125	250		$\mu\text{cd}$
		20mA D.C.		640		$\mu\text{cd}$
		60mA Pk: 1 of 6 Duty Factor		450		$\mu\text{cd}$
Peak Wavelength	$\lambda_{\text{peak}}$			565		nm
Dominant Wavelength <sup>(6)</sup>	$\lambda_d$			572		nm
Forward Voltage/Segment or D.P.	$V_F$	$I_F = 10\text{mA}$		1.9		V
		$I_F = 20\text{mA}$		2.2	2.5	V
		$I_F = 60\text{mA}$		2.9		V
Reverse Current/Segment or D.P.	$I_R$	$V_R = 0\text{V}$		10		$\mu\text{A}$
Response Time <sup>(7)</sup>	$t_r, t_f$			90		ns
Temperature Coefficient of $V_F$ /Segment or D.P.	$\Delta V_F/^\circ\text{C}$			-2.0		mV/°C

## NOTES

- 5 The digits are categorized for luminous intensity with the intensity category designated by a letter located on the right hand side of the package  
 6 The dominant wavelength,  $\lambda_d$ , is derived from the CIE Chromaticity Diagram and is that single wavelength which defines the color of the device  
 7 Time for a 10% - 90% change of light intensity for step change in current.  
 8 Temperature coefficient of luminous intensity  $I_A/^\circ\text{C}$  is determined by the formula:  $I_{T_A} = I_{T_{ref}} e^{k(T_A - T_{ref})}$

DEVICE	K
-7650 Series	-0.131/°C
-7660 Series	-0.112/°C
-7670 Series	-0.104/°C

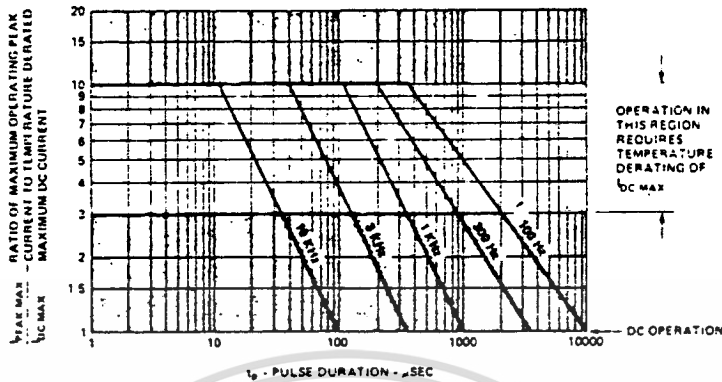


Figure 1. Maximum Tolerable Peak Current vs. Pulse Duration.

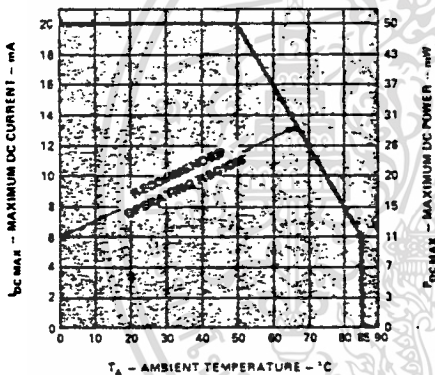


Figure 2. Maximum Allowable DC Current and DC Power Dissipation Per Segment as a Function of Ambient Temperature.

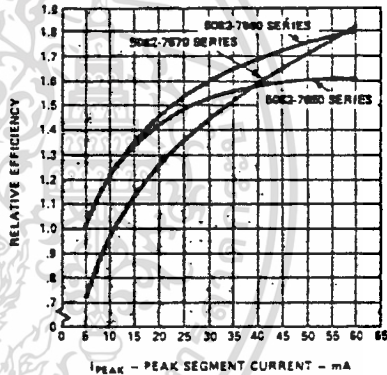


Figure 3. Relative Luminous Efficiency (Luminous Intensity per Unit Current) vs. Peak Segment Current.

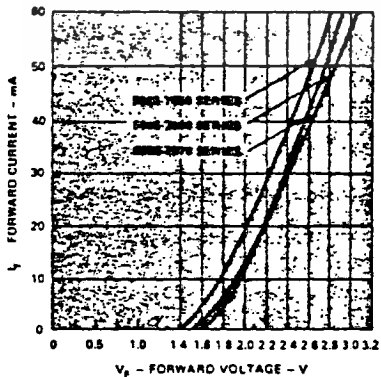


Figure 4. Forward Current vs. Forward Voltage Characteristic.

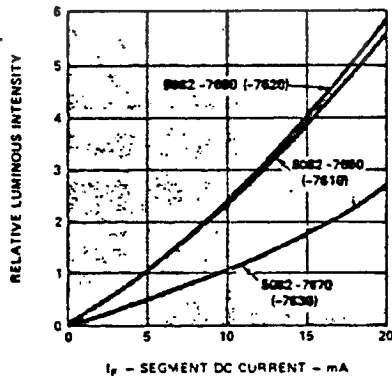


Figure 5. Relative Luminous Intensity vs. DC Forward Current

## Operational Considerations

### ELECTRICAL

The 5082-7600 series of display products are arrays of eight light emitting diodes which are optically magnified to form seven individual segments plus a decimal point.

The diodes in these displays utilize a Gallium Arsenide Phosphide junction on a Gallium Phosphide substrate to produce high efficiency red and yellow emission spectra and a Gallium Phosphide junction for the green. In the case of the red displays, efficiency is improved by at least a factor of 4 over the standard Gallium Arsenide Phosphide based technology. The use of Gallium Phosphide as the substrate does result in an internal dynamic resistance in the range of 12-48Ω. It is this resistance which causes the substantially higher forward voltage specifications in the new devices.

The user should be careful to scale the appropriate forward voltage from the  $V_F$  versus  $I_F$  curve, Figure 4, when designing for a particular forward current. Another way to obtain  $V_F$  would be to use the following formula:

$$V_F = V_{3mA} + R_S (I_F - 5mA)$$

where  $V_{3mA}$  and  $R_S$  are found in the following table:

Device	$V_{3mA}$	$R_S$
-7650 Series	1.65V	21Ω
-7660 Series	1.75V	25Ω
-7670 Series	1.85V	19Ω

Figure 1 relates refresh rate,  $f$ , and pulse duration,  $t_p$ , to a ratio which defines the maximum desirable operating peak current as a function of derated dc current,  $I_{P\ MAX}/I_{DC\ MAX}$ . To most effectively utilize Figure 1, perform the following steps:

1. Determine desired duty factor.  
Example: Four digit display, duty factor = 1/4
2. Determine desired refresh rate,  $f$ . Use duty factor to calculate pulse duration,  $t_p$ .  
Note:  $t_p =$  Duty Factor  
Example:  $f=1$  kHz;  $t_p=250$  μsec
3. Enter Figure 1 at the calculated  $t_p$ . Move vertically to the refresh rate line and then record the corresponding value of  $I_{P\ MAX}/I_{DC\ MAX}$ .  
Example: At  $t_p=250$  μsec and  $f=1$  kHz,  
 $I_{P\ MAX}/I_{DC\ MAX} = 4.0$
4. From Figure 2, determine the value for  $I_{DC\ MAX}$ .  
Note:  $I_{DC\ MAX}$  is derated above  $T_A=50^\circ\text{C}$   
Example: At  $T_A=70^\circ\text{C}$ ,  $I_{DC\ MAX}=12\text{mA}$
5. Calculate  $I_{P\ MAX}$  from  $I_{P\ MAX}/I_{DC\ MAX}$  ratio and calculate  $I_{AVG}$  from  $I_P$  and duty factor.  
Example:  $I_P = (4.0)(12\text{mA}) = 48\text{mA peak}$   
 $I_{AVG}=(1/4)(48\text{mA}) = 12\text{mA average}$ .

The above calculations determine the maximum tolerable strobing conditions. Operation at a reduced peak current or duty factor is suggested to help insure even more reliable operation.

Refresh rates of 1kHz or faster provide the most efficient operation resulting in the maximum possible time average luminous intensity.

These displays may be operated in the strobed mode at currents up to 60mA peak. When operating at peak currents above 5mA for red and yellow or 10mA for green, there will be an improvement in the relative efficiency of the display (see Figure 3). Light output at higher currents can be calculated using the following relationship:

$$I_{V\ TIME\ AVG} = \left[ \frac{I_{AVG}}{I_{AVG\ SPEC}} \right] \left[ \frac{\eta_{I\ PEAK}}{\eta_{I\ PEAK\ SPEC}} \right] \left[ I_{V\ SPEC} \right]$$

$I_{AVG}$  = Operating point average current

$I_{AVG\ SPEC}$  = Average current for data sheet luminous intensity value,  $I_{V\ SPEC}$

$\eta_{I\ PEAK}$  = Relative efficiency at operating peak current.

$\eta_{I\ PEAK\ SPEC}$  = Relative efficiency at data sheet peak current where luminous intensity  $I_{V\ SPEC}$  is specified.

$I_{V\ SPEC}$  = Data sheet luminous intensity, specified at  $I_{AVG\ SPEC}$  and  $I_{PEAK\ SPEC}$ .

Example:  $I_P = 40\text{mA}$  and  $I_{AVG} = 10\text{mA}$ :

$$I_{V\ TIME\ AVG} = \left( \frac{10\text{mA}}{5\text{mA}} \right) \left( \frac{1.58}{1} \right) (300\mu\text{cd}) = 948\mu\text{cd/seg.}$$

### CONTRAST ENHANCEMENT

The 5082-7600 series devices have been optimized for use in actual display systems. In order to maximum "ON-OFF" contrast, the bodies of the displays have been painted to match the appearance of an unilluminated segment. The emission wavelength of the red displays has been shifted from the standard GaAsP - 655nm to 635nm in order to provide an easier to read device.

All of the colored display products should be used in conjunction with contrast enhancing filters. Some suggested contrast filters: for red displays, Paneigraphic Scarlet Red 65 or Homalite 1670; for yellow displays, Paneigraphic Amber 23 or Homalite (100-1720, 100-1726); for green, Paneigraphic Green 48 or Homalite (100-1440, 100-1425). Another excellent contrast enhancement material for all colors is the 3M light control film.

### MECHANICAL

The 5082-7600 series devices are constructed utilizing a lead frame in a standard DIP package. The individual packages may be close-packed on 12.7mm (.5in.) centers on a PC board. Also, the larger character height allows other character spacing options when desired. The leadframe has an integral seating plane which will hold the package approximately 1.52mm (.060 in.) above the PC board during standard soldering and flux removal operation. To optimize device performance, new materials are used that are limited to certain solvent materials for flux removal. It is recommended that only mixtures of Freon and alcohol be used for post solder vapor cleaning processes, with an immersion time in the vapors up to two minutes maximum. Suggested products are Freon TF, Freon TE, Genesolv DI-15 and Genesolv DE-15. Isopropyl, Ethanol or water may also be used for cleaning operations.

ภาคผนวกที่ 3

ข้อมูลจากการทดสอบเครื่องมือวัดความเร็วน้ำที่สร้างขึ้น



ตารางที่ 1

ใช้หลอดแก้วแบบที่ 1

ขนาดหยดน้ำมันผสม =  $\frac{1}{4}$  D

วัดที่ระยะ	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	เฉลี่ย	Q (head คงที่) cc/sec	น้ำมันที่ใช้
Q(measured) cc/sec	13.81	14.17	13.75	13.30	13.75	12.47	II
	13.9	14.17	13.84	13.1	13.75	13.24	↓
	21.06	20.95	21.06	20.9	20.99	18.68	↓
	22.83	22.59	22.59	22.24	22.56	21.64	↓
	25.5	26.13	26.56	26.69	26.22	28.68	↓
	-	38.38	36.55	36.45	37.13	32.43	↓
	39.43	35.26	35.36	35.7	36.44	34.92	↓
	-	40.16	39.67	39.08	39.64	38.3	↓
	37.39	43.81	47.49	49.01	44.43	43.61	II
	49.29	45.66	-	46.14	47.0	46.72	III
	65.72	61.96	60.8	59.42	61.97	48.92	↓
	55.6	54.9	56.57	58.22	56.32	55.02	↓
	65.72	67.77	70.72	70.53	68.69	66.87	III
	80.32	-	-	86.74	83.53	83.06	IV
90.36	-	92.94	-	91.65	90.58	IV	

## ตารางที่ 2

ใช้หลอดแก้วแบบที่ 2

ขนาดหยดน้ำมันผสม =  $\frac{1}{4}$  D

วัดที่ระยะ	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	เฉลี่ย Q (head คงที่) cc/sec	น้ำมันที่ใช้	
	55.6	57.1	57.1	57.1	56.7	66.0	IV (1)
	50.0	54.1	56.6	57.6	54.6	64.72	
	54.1	55.6	58.3	58.4	56.6	64.98	
	48.8	52.0	53.1	53.7	51.9	63.21	
	47.6	48.8	50.0	50.6	49.3	60.5	
	45.5	47.6	49.2	50.3	48.2	57.11	
	40.0	42.1	42.3	43.2	41.9	52.3	
	37.7	40.0	41.4	42.3	40.4	49.65	
	37.0	37.7	38.5	38.8	38.0	46.64	
	33.9	35.1	35.7	-	34.9	43.01	
Q(measured)	-	32.3	32.6	33.5	32.8	25.07	IV (1)
cc/sec	36.4	36.4	36.0	36.5	36.3	35.21	IV (2)
	34.5	31.8	31.9	32.3	32.6	32.36	
	26.3	26.7	27.3	27.4	26.9	28.25	
	25.0	23.8	23.8	23.7	24.1	25.58	
	21.7	21.9	21.7	21.8	21.8	19.46	
	18.7	19.3	19.8	19.7	19.4	16.61	IV (2)
	9.7	9.8	9.6	9.0	9.5	10.53	I
	5.9	6.0	6.2	6.5	6.67	6.49	
	5.2	5.0	4.8	4.8	5.0	5.15	
	2.7	2.8	2.8	2.8	2.8	2.95	
	2.0	2.0	2.0	1.9	2.0	2.16	I



ตารางที่ 4

ใช้หลอดแก้วแบบที่ 3

ขนาดหอยคนน้ำมันผสม =  $\frac{3}{4} D$ 

วัดที่ระยะ	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	เฉลี่ย	Q(head คงที่) cc/sec	น้ำมันที่ใช้
Q(measured) cc/sec	35.1	34.8	35.1	35.2	35.1	34.2	IV ↓ IV III III
	37.0	35.7	35.7	-	36.1	33.3	
	35.7	35.4	-	35.4	35.5	31.25	
	32.2	31.2	30.6	30.3	31.1	25.0	
	26.3	26.0	25.8	25.8	26.0	22.4	
	13.9	13.9	13.6	13.6	13.8	15.6	
	13.2	13.1	13.0	13.0	13.1	12.9	
	8.3	8.2	8.3	8.3	8.3	8.6	
	2.7	2.7	2.7	2.8	2.7	3.6	

ตารางที่ 5

ใช้หลอดแก้วแบบที่ 3

ขนาดหอยคนน้ำมันผสม = D

วัดที่ระยะ	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	เฉลี่ย	Q(head คงที่) cc/sec	น้ำมันที่ใช้
Q(measured) cc/sec	14.5	14.3	14.0	13.8	14.2	15.6	IV
	13.2	12.9	12.9	12.9	13.0	12.9	IV
	9.0	8.6	8.5	8.5	8.7	8.6	III
	3.2	2.8	3.0	2.8	3.0	3.6	III

