

รายการอ้างอิง

- [1] Ramos R. J., Bianchi R. F., Balogh D. T., Faria R. M. Conductivity of carbon black-PE composites as a function of temperature and UV aging. IEEE Trans on Dielect. Insul. 7,6 (Dec 2000) : 855-859.
- [2] Pinheiro W., Nachvalger E. E., Oliveire J. J. S. Caron L. E., Ruvolo F., Castro A. F., Faria R. M., Oliveire R. B. L., Dirani E. A. T. Fonseca F. J., Andrade A. M. Study of polymeric material characteristics on covered conductors used in Brazil. IEEE Annual report (Oct 1996) : 416 - 419.
- [3] Rungsevijitprapa W. Influence of dry ageing on the breakdown behavior of XLPE insulated high voltage cables. doctoral thesis, University of Hannover, Cuvillier verlag, Germany, 2001.
- [4] ขวลิต ดำรงรัตน์. การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า. เล่ม 1. ซีเอ็ดบุ๊คเซ็นเตอร์, 2547.
- [5] National Electrical Safety Code. Part : Safety rules for overhead lines. 2002 edition. Institute of Electrical and Electronics Engineers.2002.
- [6] NEMA WC 7-1988/ICEA S-66-524. Crosslinked Polyethylene Insulated Wire & Cable. 2000.
- [7] ASTM D-412. Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers Tension.2002.
- [8] R. Bartnikas, K.D. Srivastava. Power and Communication Cables Theory and Applications. A JOHN WILEY & SONS.1999.
- [9] IEC Publication No. 60287-1-1. Calculation of the current rating-Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses-Generation. 2001.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 แสดงการเปรียบเทียบขนาดสายโดยประมาณ

มาตรฐานอเมริกัน (cm.)	มาตรฐาน มอก. (mm ²)	กระแสที่ใช้งาน (A)
No.5 AWG	16	110
No.3 AWG	25	145
No.2 AWG	35	180
No.1/0 AWG	50	225
No.2/0 AWG	70	270
No.3/0 AWG	95	340
250 MCM	120	390
266.8 MCM	150	455
336.4 MCM	185	550
397.5 MCM	240	625
556.5 MCM	300	710
795.0 MCM	400	855
954.0 MCM	500	990
1192.5 MCM	625	1140
1510.5 MCM	800	1340
1590.0 MCM	1000	1540

ตารางที่ ก.2 แสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุตัวนำที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะทางกล

วัสดุ	ทองแดง อบอ่อน	ทองแดงรีดแข็ง	อลูมิเนียม	เหล็กกล้า	ทองเหลือง
พิกัดยึดหยุน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	-	25,000 - 30,000	25,000 - 30,000	40,000 - 150,000	25,000 - 65,000
ความแข็งแรงแตกหัก (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	34,000	50,000 - 65,000	23,000 - 30,000	70,000 - 250,000	60,000 - 140,000
มอดุลัสยึดหยุน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	-	$16 - 18 \times 10^6$	10×10^6	$24 - 30 \times 10^6$	$15 - 18 \times 10^6$

ตารางที่ ก.3 ขนาดของดัมเบลล์ตามมาตรฐาน Dies^A (ระบบเมตริก)

ขนาด	หน่วย	ความคลาด						
		เคลื่อน	Die A	Die B	Die C	Die D	Die E	Die F
A	มม.	±1	25	25	25	16	16	16
B	มม.	max	40	40	40	30	30	30
C	มม.	min	140	140	115	100	125	125
D	มม.	±6	32	32	32	32	32	32
D-E	มม.	±1	13	13	13	13	13	13
F	มม.	±2	38	38	19	19	19	19
G	มม.	±1	14	14	14	14	14	14
H	มม.	±2	25	25	25	16	16	16
L	มม.	±2	59	59	33	33	33	33
W	มม.	±0.05, -0.00	12	6	6	3	3	6
Z	มม.	±1	13	13	13	13	13	13

ขนาด Dies^A ที่ใช้ในหน่วยเมตริกเป็นค่าที่ไม่แน่นอนเหมือนกับขนาดที่แสดงในหน่วย U.S. customary^๔

ขนาด Dies ที่ใช้ในหน่วยเมตริกมีไว้สำหรับการปรับตั้งเครื่องมือในหน่วยเมตริก

ตารางที่ ก.4 ขนาดของดัมเบลล์ตามมาตรฐาน Dies^A (ระบบ U.S. Customary)

ขนาด	หน่วย	ความคลาด						
		เคลื่อน	Die A	Die B	Die C	Die D	Die E	Die F
A	นิ้ว	±0.04	1	1	1	0.62	0.62	0.62
B	นิ้ว	max	1.6	1.6	1.6	1.2	1.2	1.2
C	นิ้ว	min	5.5	5.5	4.5	4	4	4
D	นิ้ว	±0.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
D-E	นิ้ว	±0.04	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
F	นิ้ว	±0.08	1.5	1.5	0.75	0.75	0.75	0.75
G	นิ้ว	±0.04	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
H	นิ้ว	±0.08	1	1	1	0.63	0.63	0.63
L	นิ้ว	±0.08	2.32	2.32	1.31	1.31	2.32	2.32
W	นิ้ว	±0.002, -0.00	0.500	0.250	0.500	0.125	0.125	0.250
Z	นิ้ว	±0.04	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

ขนาด Dies^A ที่ใช้ในหน่วยเมตริกซ์เป็นค่าที่ไม่แน่นอนเหมือนกับขนาดที่แสดงในหน่วย U.S. customary

ขนาด Dies ที่ใช้ในหน่วยเมตริกซ์มีไว้สำหรับการปรับตั้งเครื่องมือในหน่วยเมตริกซ์

ตารางที่ ก.5 คุณลักษณะที่กำหนดของสายไฟฟ้าหุ้มฉนวนชิงในอากาศ (SAC) ตามมาตรฐาน ICEA S-66-524

รายละเอียด	หน่วย	ค่ากำหนด
ฉนวน		
ก. ก่อนเร่งอายุการใช้งาน		
- ความต้านแรงดึงต่ำสุด	นิวตัน/ตร.มม.	12.5
- ความยืดต่ำสุด	%	250
ข. หลังเร่งอายุการใช้งานที่ $121^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 168 ชั่วโมง		
- ความต้านทานแรงดึงต่ำสุด เมื่อเทียบกับก่อนเร่งอายุการใช้งาน	%	75
- ความยืดต่ำสุด เมื่อเทียบกับก่อนเร่งอายุการใช้งาน	%	75
ค. ความยืดสูงสุดเมื่อได้รับความร้อนที่ $150^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 15 นาที	%	175
ง. ความยืดสูงสุด หลังจากปล่อยให้เย็นลง	%	10
เปลือก		
ก. ก่อนเร่งอายุการใช้งาน		
- ความต้านแรงดึงต่ำสุด	นิวตัน/ตร.มม.	12.5
- ความยืดต่ำสุด	%	250
ข. หลังเร่งอายุการใช้งานที่ $121^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 168 ชั่วโมง		
- ความต้านทานแรงดึงต่ำสุด เมื่อเทียบกับก่อนเร่งอายุการใช้งาน	%	75
- ความยืดต่ำสุด เมื่อเทียบกับก่อนเร่งอายุการใช้งาน	%	75
ค. ความยืดสูงสุดเมื่อได้รับความร้อนที่ $150^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 15 นาที	%	175
ง. ความยืดสูงสุด หลังจากปล่อยให้เย็นลง	%	10

ภาคผนวก ข

การคำนวณพิภักดกระแสของสายไฟฟ้าหุ้มฉนวนขึงในอากาศ (SAC) ตามแนวทาง
มาตรฐาน IEC 60287-1-1[9]

สูตรการคำนวณ สำหรับสาย SAC ที่ติดตั้งกลางแจ้งกลางแจ้งโดยตรง

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + T_3 + T_4] - \sigma D_e H T_4}{RT_1 + RT_3 + RT_4} \right]^{1/2}$$

$\Delta\theta$ = ความแตกต่างของอุณหภูมิตัวนำที่สูงกว่าอุณหภูมิโดยรอบ (K)

W_d = พลังงานสูญเสียเปล่าไดโอดเล็กตริกต่อหนึ่งหน่วยความยาวต่อเฟส (W/m)

T_1 = ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างตัวนำและเปลือกนอก (K.m/W)

T_3 = ความต้านทานเชิงความร้อนของเปลือกภายนอก (K.m/W)

T_4 = ความต้านทานเชิงความร้อนภายนอกจากการติดตั้งกลางแจ้งโดยตรง
(K.m/W)

σ = สัมประสิทธิ์การดูดซับการแผ่รังสีของผิวภายนอกสาย SAC จากแสงอาทิตย์

D_e = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของสาย SAC (m)

H = อินเทนซิตีของการแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ = 10^3 W/m²

R = ความต้านทานกระแสกลับของตัวนำ

สำหรับสายไฟฟ้าหุ้มฉนวนขึงในอากาศที่ใช้กับระบบ 33 กิโลโวลต์ มีข้อมูลเส้นผ่าน
ศูนย์กลางของตัวนำ เส้นผ่านศูนย์กลางรวมของสายทั้งหมด ความหนาของฉนวนและเปลือกนอก
ดังตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลจากสเปค กฟภ.

ขนาด (ตร.มม.)	Case I (มม.)		Case II (มม.)		Case I (มม.)	Case II (มม.)	t_1	t_3
	D_i	d_c	D_i	d_c	D_3	D_3		
50	24.20	8.25	24.60	8.33	17.850	18.250	4.445	3.175
95	27.30	11.30	27.70	11.45	20.950	21.350	4.445	3.175
120	28.80	12.80	29.20	12.95	22.450	22.850	4.445	3.175
185	32.00	15.80	32.20	15.98	25.650	25.850	4.445	3.175

ซึ่ง D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรวมของสายทั้งหมด (มม.)

d_c คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (มม.)

D_3 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรวมของตัวนำกับฉนวนของสาย SAC (มม.)

Case I เป็นค่าต่ำสุดของสเปค กฟภ.

Case II เป็นค่าเฉลี่ยของสเปค กฟภ.

หาค่า $\Delta\theta$ ผลต่างของอุณหภูมิใช้งานสูงสุดของตัวนำกับอุณหภูมิโดยรอบ (40°C)

$$= 90 - 40 = 50$$

หาค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของสาย SAC (W_d)

$$W_d = \omega \cdot C \cdot V^2 \cdot \tan \delta \quad (\text{W/m})$$

เมื่อ V คือ แรงดันเฟสกับกราวด์ของระบบ (โวลต์)

C คือ ค่าคาปาซิเตอร์ของสายหุ้มฉนวนทรงกลม (F/m)

$$= \frac{\epsilon \times 10^{-9}}{18 \ln(D_i / d_c)} \quad (\text{F/m})$$

d_c คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของสายตัวนำภายในฉนวนเคเบิล (มม.)

D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางทั้งหมดของสายเคเบิล (มม.)

ϵ ของฉนวน XLPE = 2.5 , $\tan \delta = 0.004$

$$C = \frac{2.5 \times 10^{-9}}{18 \ln(D_i / d_c)}$$

$$W_d = 2\pi \times 50 \times (19.05 \times 10^3)^2 \times C \times 0.004$$

ซึ่ง ค่าคาปาซิเตอร์ของสาย(C)และค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของสาย SAC(W_d)
ดังตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.2 ค่าคาปาซิเตอร์ของสาย(C)และค่าพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของสาย SAC(W_d)

ขนาด (ตร.มม.)	Case I (มม.)		Case II (มม.)	
	C	W_d	C	W_d
50	1.29062E-10	0.058865	1.28258E-10	0.058498
95	1.57455E-10	0.071815	1.57213E-10	0.071704
120	1.71271E-10	0.078116	1.7082E-10	0.077910
185	1.96803E-10	0.089761	1.98235E-10	0.090414

ความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างตัวนำและเปลือกนอก (T_r)

$$T_r = \frac{\rho_r \ln[1 + (2t_r / d_c)]}{2\pi} \quad (\text{K.m/W})$$

d_c คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของสายตัวนำภายในฉนวนเคเบิล (มม.)

t_r คือ ความหนาของฉนวนสาย SAC ระหว่างตัวนำและเปลือกนอก (มม.)

ρ_r คือ พิกัดความต้านทานทางความร้อนของฉนวน (K.m/W)

ρ_r ของ XLPE = 3.5

ซึ่งค่าความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างตัวนำและเปลือกนอก (T_r) แสดงดังตารางที่ ข.3

ตารางที่ ข.3 ค่าความต้านทานเชิงความร้อนระหว่างตัวนำและเปลือกนอก (T_r)

ขนาด (ตร.มม.)	T_r (K.m/W)			
	50	95	120	185
case I	0.407257	0.323256	0.293749	0.248624
case II	0.404476	0.320034	0.291098	0.246361

ความต้านทานเชิงความร้อนของเปลือกภายนอก (T_3)

$$T_3 = \frac{\rho_r \ln[1 + (2t_3 / D_3)]}{2\pi} \quad (\text{K.m/W})$$

D_3 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเปลือกนอกสายเคเบิล (มม.)

t_3 คือ ความหนาของเปลือกนอกสาย SAC (มม.)

ρ_r คือ พิกัดความต้านทานทางความร้อนของเปลือกนอก (K.m/W)

ρ_r ของ XLPE = 3.5

ซึ่งค่าความต้านทานเชิงความร้อนของเปลือกภายนอก (T_3) แสดงดังตารางที่ ข.4

ตารางที่ ข.4 ค่าความต้านทานเชิงความร้อนของเปลือกภายนอก (T_3)

ขนาด (ตร.มม.)	T_3 (K.m/W)			
	50	95	120	185
case I	0.169513	0.147456	0.138732	0.123197
case II	0.166300	0.145024	0.136578	0.122341

ความต้านทานเชิงความร้อนภายนอกจากการติดตั้งกลางแจ้งแสงอาทิตย์โดยตรง (T_4)

$$T_4 = \frac{1}{\pi D_e h (\Delta\theta_s)^{1/4}} \quad (\text{K.m/W})$$

โดยที่ h คือ heat dissipation coefficient

$$h = \frac{Z}{(D_e)^g} + E$$

สำหรับสาย SAC ตัวนำเส้นเดียว $Z = 0.21$, $E = 3.94$, $g = 0.60$

$\Delta\theta_s$ คือ อุณหภูมิของผิวสาย SAC ที่สูงเกินกว่าอุณหภูมิโดยรอบ (K)

$(\Delta\theta_s)^{1/4}$ คือ เป็นค่าที่ได้จากแผนภูมิหน้า 127 ตามมาตรฐาน IEC 60287-2001

โดยต้องหาค่า K_A , $\Delta\theta_d$, $\Delta\theta_{cs}$ ก่อน

$$K_A = \pi D_o \dot{h} (T_1 + T_3)$$

ซึ่ง D_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางทั้งหมดของสาย (ม.)

ตารางที่ ข.5 แสดงค่า K_A

ขนาด (ตร.มม.)	K_A			
	50	95	120	185
case I	0.258683	0.232643	0.223240	0.209213
case II	0.259380	0.232575	0.223255	0.208524

$$\Delta\theta_d = \frac{W_d T_1}{2}$$

ตารางที่ ข.6 แสดงค่า $\Delta\theta_d$

ขนาด (ตร.มม.)	$\Delta\theta_d$			
	50	95	120	185
case I	0.0119865	0.0116073	0.01147327	0.01115841
case II	0.0118306	0.0114739	0.01133978	0.01113726

$$\Delta\theta_{ds} = \sigma D_o \dot{H} (T_1 + T_3)$$

ซึ่ง σ คือ สัมประสิทธิ์การดูดซับการแผ่รังสีของผิวภายนอกสาย SAC จากแสงอาทิตย์

ซึ่ง XLPE มีค่า 0.4

D_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของสาย SAC (ม)

H คือ อินเทนซิตีของการแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ = 10^3 W/m^2

ตารางที่ ข.7 แสดงค่า $\Delta\theta_{ds}$

ขนาด (ตร.มม.)	$\Delta\theta_{ds}$			
	50	95	120	185
case I	5.583142	5.140193	4.982195	4.759328
case II	5.616446	5.152854	4.995277	4.748897

ตารางที่ ข.8 แสดงค่า $\Delta\theta + \Delta\theta_d + \Delta\theta_{ds}$

ขนาด (ตร.มม.)	$\Delta\theta + \Delta\theta_d + \Delta\theta_{ds}$			
	50	95	120	185
case I	55.5951	55.1518	54.9937	54.7705
case II	55.6283	55.1643	55.0066	54.7600

จากแผนภูมิหน้า 127 ตามมาตรฐาน IEC 60287-1-1 จะหาค่า $(\Delta\theta_g)^{1/4}$ ได้ดังตารางที่ ข.9

ตารางที่ ข.9 แสดงค่า $(\Delta\theta_g)^{1/4}$

ขนาด (ตร.มม.)	$(\Delta\theta_g)^{1/4}$			
	50	95	120	185
case I	2.42	2.44	2.45	2.46
case II	2.42	2.44	2.45	2.46

ความต้านทานเชิงความร้อนภายนอกจากการติดตั้งกลางแจ้งดูแสงอาทิตย์โดยตรง (T_4^*) สามารถหาได้ดังตารางที่ ข.10

ตารางที่ ข.10 แสดงค่า T_4^*

ขนาด (ตร.มม.)	T_4^*			
	50	95	120	185
case I	0.92134	0.82923	0.79073	0.72245
case II	0.90931	0.81951	0.78189	0.71876

ความต้านทานกระแสลับของตัวนำ (R)

$$R = R'(1 + Y_s + Y_p)$$

โดย R' คือ ความต้านทานกระแสตรงของตัวนำที่อุณหภูมิสูงสุด (Ω/m)

$$R' = R_0[1 + \alpha_{20}(\theta - 20)]$$

θ คือ อุณหภูมิใช้งานสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$)

α_{20} คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิต่อ K 20°C

ตัวประกอบ skin effect (Y_s)

$$Y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0.8X_s^4}$$

และ

$$X_s^2 = \frac{8\pi \cdot 10^{-7} \cdot k_s}{R'}$$

$K_s = 1$ สำหรับอลูมิเนียม

ตัวประกอบ proximity effect (Y_p)

$$Y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} (d_c / S)^2 \left[0.312(d_c / S)^2 + \frac{1.18}{\frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} + 0.27} \right]$$

และ

$$X_p^2 = \frac{8\pi \cdot 10^{-7} \cdot k_p}{R'}$$

เมื่อ S คือ ระยะห่างระหว่างเฟส (มม.)

$K_p = 0.8$ สำหรับอลูมิเนียม

ตารางที่ ข.11 แสดงค่า R_0 , R' , X_s^2 , Y_s , X_p^2 , d_c , Y_p และ R

ขนาด (ตร.มม.)	50	95	120	185
$R_0(\Omega/\text{km})$	0.592	0.313	0.245	0.161
R'	0.000759	0.000401	0.000314	0.000206
X_s^2	0.165586	0.313184	0.400109	0.608861
Y_s	0.0001428	0.0005106	0.0008332	0.0019278
X_p^2	0.132468	0.250547	0.320087	0.487089
d_c class I	8.25	11.3	12.8	15.8
d_c class II	8.33	11.45	12.95	15.98
S (mm)	550	550	550	550
d_c/S I	0.015000	0.020545	0.023273	0.028727
d_c/S II	0.015145	0.020818	0.023545	0.029055
Y_p class I	8.984E-08	6.023E-07	1.2602E-06	4.4324E-06
Y_p class II	9.159E-08	6.184E-07	1.2899E-06	4.534E-06
R class I	0.00075911	0.00040150	0.00031438	0.00020682
R class II	0.00075911	0.00040150	0.00031438	0.00020682

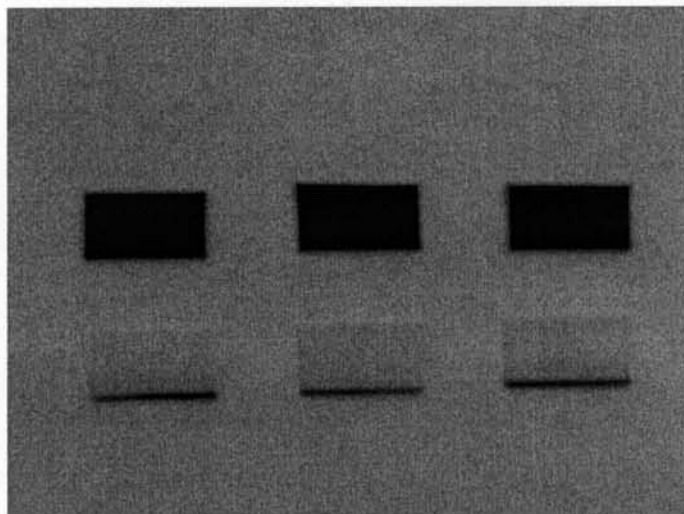
สามารถคำนวณพิกัดกระแสของสายไฟฟ้าหุ้มฉนวนขึงในอากาศ (SAC) ได้ดังตารางที่ ข.12

ตารางที่ ข.12 พิกัดกระแสของสายไฟฟ้าหุ้มฉนวนขึงในอากาศ (SAC) ที่ใช้กับแรงดัน 33 กิโลโวลต์

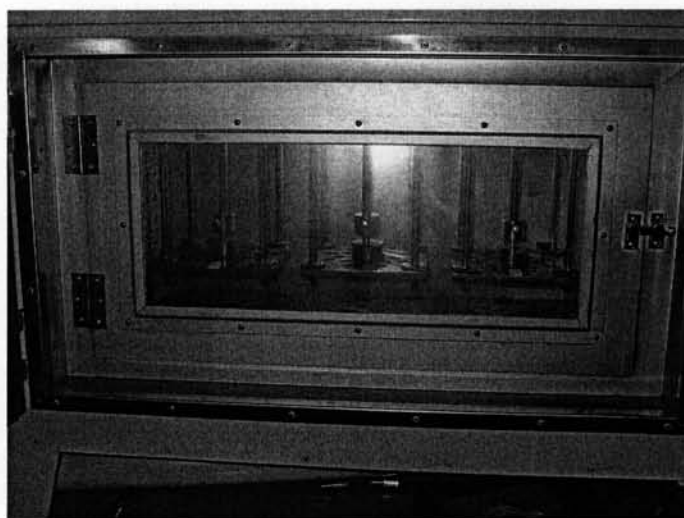
ขนาด (ตร.มม.)	กระแส (แอมป์)			
	50	95	120	185
case I	189.71	279.53	325.42	423.44
case II	190.81	281.12	327.16	424.71

ภาคผนวก ค

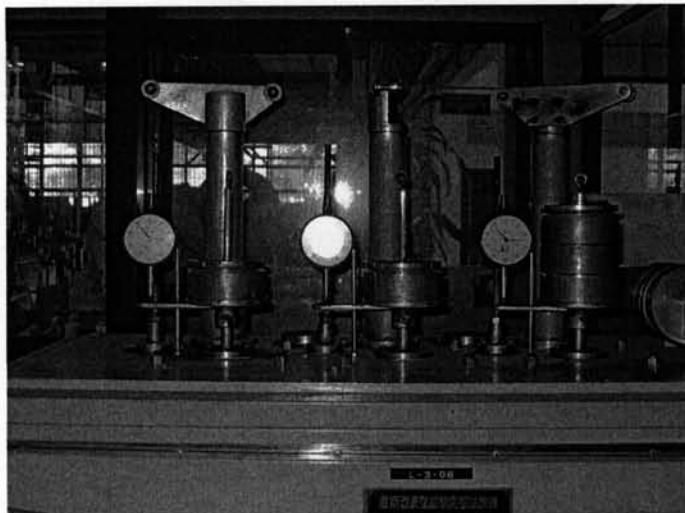
การเตรียมชิ้นตัวอย่างในการทดสอบ Heat Distortion และอุปกรณ์ทดสอบ



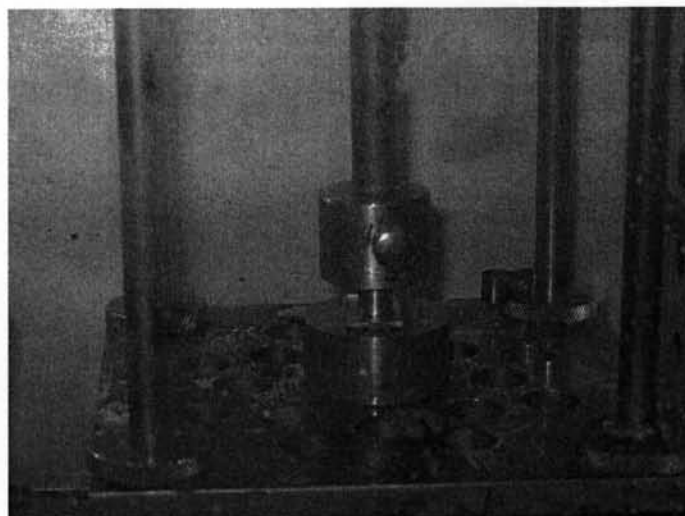
รูปที่ ค.1 การเตรียมชิ้นตัวอย่างเป็นแผ่นสียห่อยมผืนผ้าขนาด 25.4 x 14.3 มิลลิเมตร หนา 1.27 มิลลิเมตร



รูปที่ ค.2 ตู้อบที่มี Dial micrometer



รูปที่ ค.3 Pressure Foot ที่ใช้วัดความหนาแน่น



รูปที่ ค.4 ชิ้นงานสำเร็จรูปที่ถูกกดทับจากตุ้มน้ำหนัก

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพรชัย ทีอุปมา เกิดวันที่ 26 สิงหาคม พ.ศ. 2522 ที่ อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ในปีการศึกษา 2545 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย