

เอกสารอ้างอิง

1. ACI Publication SP - 25. Zolders, N.G. "Thermal Properties of Concrete under Sustained Elevated Temperature." pp.1-32. American Concrete Institute, Detroit, 1970.
2. ACI Publication SP - 25. Sullivan, P.J. and Paucher, M.P. "The Influence of Temperature on the Physical Properties of Concrete and Mortar in the Range 20 to 400° C." pp. 103-136. American Concrete Institute, Detroit, 1970.
3. ACI Publication SP - 25. Abrams, M.S. "Compressive Strength of Concrete at Temperature to 1600 F." pp. 33-58. American Concrete Institute, Detroit, 1970.
4. ACI Publication SP - 34. Harada, T., Takada, J., Yamane, S. and Furumura, F. "Strength, Elasticity and Thermal Properties of Concrete Subjected to Elevated Temperatures." pp. 377-406. American Concrete Institute, Detroit, 1972.
5. ACI Publication SP - 27. Wang, C.H. "Creep of Concrete at Elevated Temperatures." pp. 387-400. American Concrete Institute, Detroit, 1971.
6. Holmes, M., Anchor, R.D., Cook, G.M.E. and Crook, R.N. "The Effects of Elevated Temperature on the Strength Properties of Reinforcing and Prestressing Steels." The Structural Engineer. Vol. 60B, No. 1 (1982): 7-13.
7. British Standard Institution. "Specification for Prestressed Concrete Pressure Vessels for Nuclear Reactors, (BS 4975: 1973)." British Standard Institution, London, 1973.

8. ACI Publication SP - 25. Northup, T.E. and Ople, F.S. "Effect of Temperature on a Prestressed Concrete Reactor Vessel Model." pp. 149-172. American Concrete Institute, Detroit, 1970.
9. ACI Publication SP - 34. Bertero, V.V. and Polivka, M. "Influence of Thermal Exposures on Mechanical Characteristics of Concrete." pp. 505-531. American Concrete Institute, Detroit, 1972.
10. Rashid, Y.R. and Rockenhauser, W. "Pressure Vessel Analysis by Finite Element Techniques." Conference on Prestressed Concrete Pressure Vessels. pp. 375-383. The Institution of Civil Engineers, London, 1968.
11. Barrett, N.T. and Murray, J.T. "Creep in Pressure Vessels at Elevated Temperatures." Conference on Prestressed Concrete Pressure Vessels. pp. 153-165. The Institution of Civil Engineers, London, 1968.
12. ACI Publication SP - 34. David, M. "Analysis of Prestressed Concrete Pressure Vessels for Nuclear Reactors in Czechoslovakia." pp. 203-219. American Concrete Institute, Detroit, 1972.
13. Rashid, Y.R. "Nonlinear Analysis of Two - dimensional Problems in Concrete Creep." Transaction of the ASME Journal of Applied Mechanics 39 (1972): 475-482.
14. England, G.L. "A Direct Method of Structural Analysis for Creep in Heated Concrete Structures." 3rd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, pp. H 3/1. London, 1975.

15. Jordaan, I.J. and Khalifa, M.M.A. "Creep Analysis of Reinforced and Prestressed Concrete Structures under Non-Uniform Temperature Distributions, Using Elastic Solutions." International Journal for Numerical Methods in Engineering. 11 (1977): 883-895.
16. ACI Publication SP-25. Nasser, K.W. "Creep of Concrete at Low Stress-Strength Ratios and Elevated Temperatures." pp. 137-148. American Concrete Institute, Detroit, 1970.
17. ACI Publication SP-34. Geymayer, H.G. "Effect of Temperature on Creep of Concrete : A Literature Review." pp. 565-589. American Concrete Institute, Detroit, 1972.
18. Abrams, M.S. and Cruz, C.R. "The Behaviour at High Temperature of Steel Strand for Prestressed Concrete." Journal of the PCA Research Development Laboratories. 3(1961) : 8-19.
19. Bate, S.C.C. and Corson, R.H. "Effect of Temperature on Prestressing Wires." Conference on Prestressed Concrete Pressure Vessels. pp. 237-240. The Institution of Civil Engineers, London, 1968.
20. Cahill, T. and Branch, G.D. "Long-Term Relaxation Behaviour of Stabilized Prestressing Wires and Strands." Conference on Prestressed Concrete Pressure Vessels. pp. 219-228. The Institution of Civil Engineers, London, 1968.
21. Wilson, E.L. "SOLID SAP : A Static Analysis Program for Three Dimensional Solid Structures." Report UC SESM 71-19, Structures and Materials Research, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, California, 1971.

22. Argyris, J.H., Pister, K.S., Szimmat, J. and Willam, K.J. "Unified Concepts of Constitutive Modelling and Numerical Solution Methods for Concrete Creep Problems." Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 10(1979) : 199-246.
23. Myers, G.E. Analytical Methods in Conduction Heat Transfer. pp. 14-15. McGraw-Hill, 1971.
24. Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N. Theory of Elasticity, 3rd edition, pp. 448-452. McGraw-Hill, 1970.
25. Neville, A.M. Properties of Concrete. Pitman, London, 1965.
26. PCI Committee on Prestress Losses. "Recommendation for Estimating Prestress Losses." PCI Journal. V.20, No. 4, (1975) : 43-75.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของหินชนิดต่าง ๆ (1)

ชนิดของหิน	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (กิโลแคลอรี/ม.-ซม.-°ซ)	
	ที่ 100 °ซ	ที่ 573 °ซ
Granite	2.02	1.60
Qtz Monzonite	2.20	1.45
Rhyolite	2.50	1.60
Nepheline Syenite	1.85	1.35
Anorthosite	1.65	1.55
Quartz	5.00	2.15
Taconite	3.80	2.24
Hornbl.-Qtz-Gneiss	2.50	1.82
Dolom. Limestone	2.00	1.15
Dolostone	3.45	1.80
Limestone	2.24	1.43

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แหล่งที่มา :

Nishifuji, I. "Heat Conduction of Material and Construction."
Transactions, Architectural Institute of Japan, Tokyo, No.31,
July 1944.

ตารางที่ 2.2 ผลของความชื้นต่อการนำความร้อนของคอนกรีต (1)

มวลรวม ตัวอย่างที่	เปอร์เซ็นต์ความชื้น โดยน้ำหนัก	ความหนาแน่น (กก./ม ³)	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (กิโลแคลอรี/ม.-ชม.-°ซ)
<u>Dolerite</u> No. 124	8.4	2370	1.74
	5.2	2290	1.46
	3.5	2260	1.32
	2.2	2230	1.25
	0.0	2180	1.10
<u>Barite</u> No. 161	5.3	3080	1.80
	4.8	3060	1.76
	4.0	3030	1.68
	0.0	2920	1.18
<u>Hematite</u> No. 131	8.0	3060	3.69
	9.7	3030	3.54
	7.0	2980	3.26
	0.0	2840	2.26

ศูนย์วิทยพัทยาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แหล่งที่มา :

Davis, H.S. "Effects of High-Temperature Exposure on Concrete."

Materials Research and Standards, V.7 No.10, Oct 1967, pp. 452-459.

ตารางที่ 2.3 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตซึ่งมีความหนาแน่นต่าง ๆ (25)

ความหนาแน่น (กก./ม ³)	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (กิโลแคลอรี/ม.-ซม.-°ซ)	
	สำหรับคอนกรีตในร่ม	สำหรับคอนกรีตกลางแจ้ง
1600	0.607	0.695
1760	0.725	0.818
1920	0.908	1.027
2080	1.131	1.279
2240	1.458	1.637
2400	1.949	2.202

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แหล่งที่มา :

A.G. Loudon and E.F. Stacy "The Thermal and Acoustic properties of light-weight concretes." Structural Concrete, 3, No.2, pp 58-95 (London, March-April 1966)

ตารางที่ 2.4 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของปูนทราย⁽²⁵⁾

อัตราส่วนซีเมนต์ต่อทราย	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ($\times 10^{-6}$ ซม./ซม. ต่อ °ซ)
1 : 0	18.5
1 : 1	13.5
1 : 3	11.2
1 : 6	10.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แหล่งที่มา :

S.L. MEYERS "Thermal Coefficient of Expansion of Portland Cement Longtime tests. "Industrial and Engineering Chemistry, 32, No.8, pp 1107-1120 (Easton, Pa., 1940)

ตารางที่ 2.5 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของหินชนิดต่าง ๆ ⁽¹⁾

ชนิดของหิน	สัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อน ($\times 10^{-6}$ ซม./ซม.ต่อ ซ)
Quartzite, Silica Shale, Cherts	11.0 - 12.5
Sandstone	10.5 - 12.0
Quartz Sands and Peebles	10.0 - 12.5
Clay and Mica Shales	9.5 - 11.0
Granites and Gneisses	6.5 - 8.5
Syenites, Feldspathic Porphyry Diorites, Andesite, Phonolite Gabbros, Diabase, Basalt	5.5 - 8.0
Dense, Crystalline, Porous Limestones	3.5 - 6.0
Pure Calcite	4.0 - 6.5
Marbles	4.0 - 7.0
Dolomites, Magnesites	7.0 - 10.0

ตารางที่ 2.6 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของหินชนิดต่าง ๆ ⁽²⁵⁾

ชนิดของหิน	สัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อน ($\times 10^{-6}$ ซม./ซม. ต่อ °ซ)
Granite	1.8 - 11.9
Diorite, Andesite	4.1 - 10.3
Gabbro, Basalt, Diabase	3.6 - 9.7
Sandstone	4.3 - 13.9
Dolomite	6.7 - 8.6
Limestone	0.9 - 12.2
Chert	7.4 - 13.1
Marble	1.1 - 16.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แหล่งที่มา :

R. Rhoades and R.C. Mielenz "Petrography of Concrete Aggregates."

J. Amer. Conc. Inst., 42, pp 581-600 (June 1946)

ตารางที่ 2.7 สัมประสิทธิ์ขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้หินชนิดต่าง ๆ (25)

ชนิดของหิน	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ($\times 10^{-6}$ ชม./ชม.ค่อ'ซ)		
	บ่มในอากาศ	บ่มในน้ำ	บ่มในอากาศและเปียก
Gravel	13.1	12.2	11.7
Granite	9.5	8.6	7.7
Quartzite	12.8	12.2	11.7
Dolerite	9.5	8.5	7.9
Sandstone	11.7	10.1	8.6
Limestone	7.4	6.1	5.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แหล่งที่มา :

D.G.R. Bonnell and F.C. Harper "The Thermal Expansion of Concrete",
National Building Studies, Technical Paper No.7, (London, H.M.S.O.,
1951)

ตารางที่ 2.8 การเสื่อมสูญแรงดึงจากแรงดึงเริ่มแรก 60, 70 และ 80 เปอร์เซ็นต์ของ กำลังรับแรงดึงประลัยของ เหล็กเสริมอัดแรง ณ จุดหมุ่ต่าง ๆ⁽¹⁹⁾ ที่เวลา 5 ปี

ชนิดของเหล็ก	หน่วยแรงดึงพิสูจน์ กก./ซม ²		กำลังรับแรงดึงประลัย กก./ซม ²	จุดหมุ่	เปอร์เซ็นต์การเสื่อมสูญแรงดึงเมื่อมีแรงดึงเริ่มแรก		
	0.1%	0.2%			60%	70%	80%
E	14900	15200	16600	18	1.7	1.1	3.5
				50	3.0	3.8	10.2
				80	4.9	8.9	16.2
				100	6.0	11.2	19.3
				120	9.3	14.6	23.6
F	13800	14300	16600	18	7.5	10.2	17.0
				50	11.6	16.4	21.9
				80	15.9	21.7	26.5
				100	17.4	23.6	29.0
				120	22.0	28.3	33.5
G	15200	16300	17400	18	4.6	7.2	10.8
				50	8.2	11.4	15.8
				80	12.9	17.0	21.0
				100	17.0	21.5	25.1
				120	23.4	26.6	30.7
H	14900	15200	17100	18	7.5	12.6	16.8
				50	12.7	16.8	21.1
				80	17.4	22.5	26.4
				100	19.0	23.6	29.0
				120	23.1	29.0	34.0

หมายเหตุ

E เป็นชนิดการผ่อนคลายตัว

F,G,H เป็นชนิดธรรมดา

ตารางที่ 4.1 แสดงผลของความหนาของฉนวนต่ออุณหภูมิแตกต่างของผนังคอนกรีตและหน่วยแรงดึงสูงสุด

ความหนาของฉนวน ซม.	อุณหภูมิแตกต่างของคอนกรีต °ซ(23)	หน่วยแรงดึงสูงสุด กก./ซม. ² (24)
0	164.3	271.2
2.5	37.0	61.1
5.0	21.1	34.8
7.5	14.9	24.6
10.0	11.6	19.1

ความหนาของผนังเท่ากับ 0.15 เมตร

คอนกรีต $E = 300000$ กก./ซม.², $\nu = 0.15$, $\alpha = 0.00001/°ซ$,

$k = 1.2$ กิโลแคลอรี/ม. - ซม. - °ซ

ฉนวน $k = 0.031$ กิโลแคลอรี/ม.²-ซม.-°ซ

อากาศ $h_0 = 10.8$ กิโลแคลอรี/ม.²-ซม.-°ซ

อุณหภูมิภายใน = 300° เซลเซียส

อุณหภูมิอากาศ = 25° เซลเซียส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 สัดส่วนผลของทรายหยาบ

ขนาดตะแกรง	เปอร์เซ็นต์ส่วนละเอียดกว่า
No. 4	98.1
No. 8	93.7
No. 20	75.4
No. 40	40.5
No. 80	3.3
No. 100	2.0
โมดูลัสความละเอียด	2.85

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

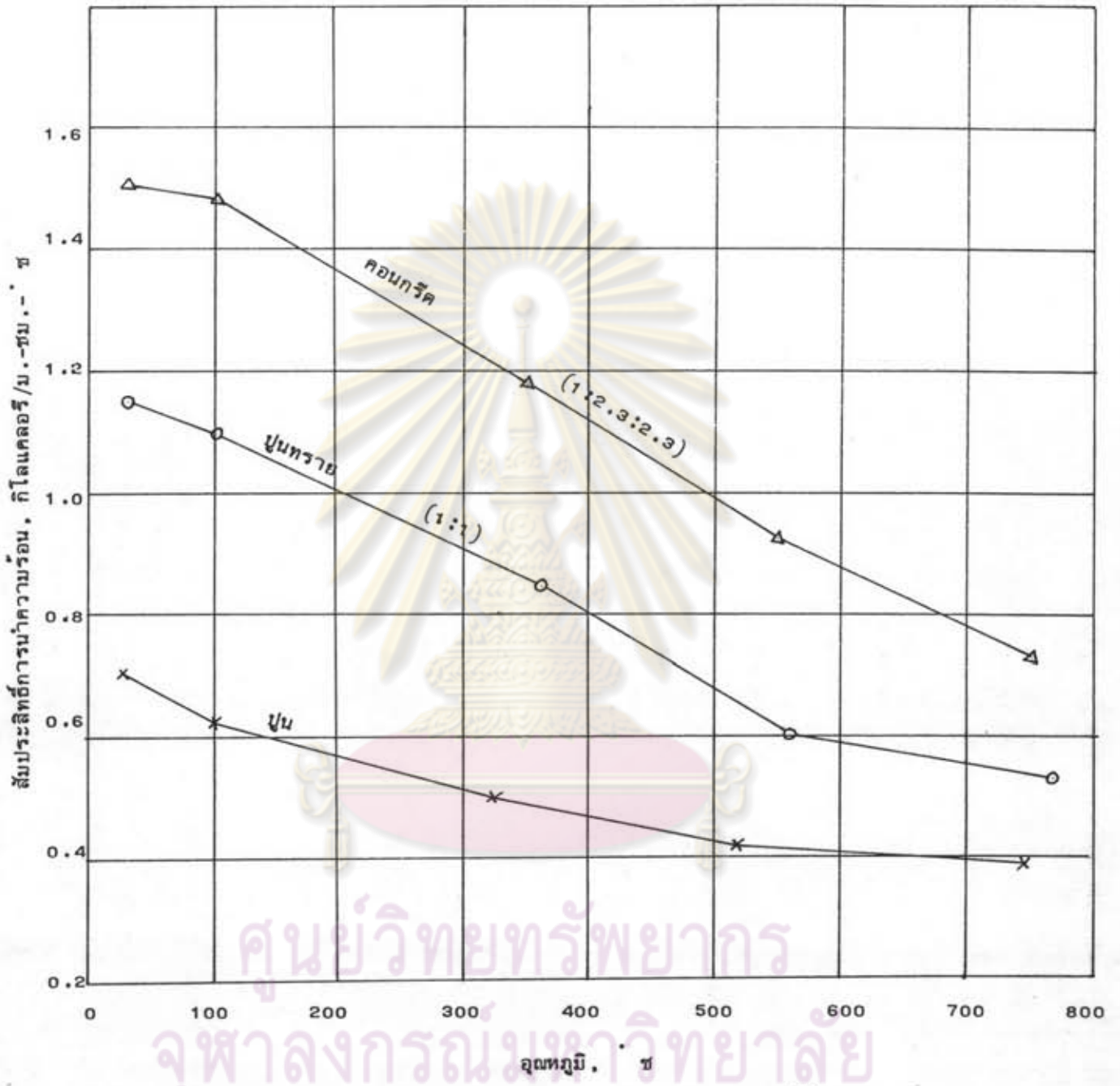


ตารางที่ 4.3 สัดส่วนผลของหินปูนขนาดโตสุด $\frac{1}{2}$ นิ้ว

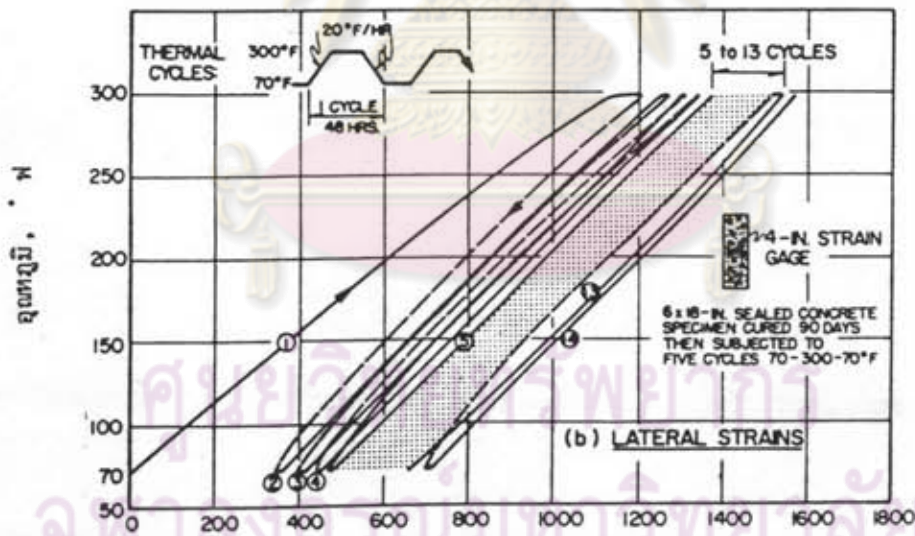
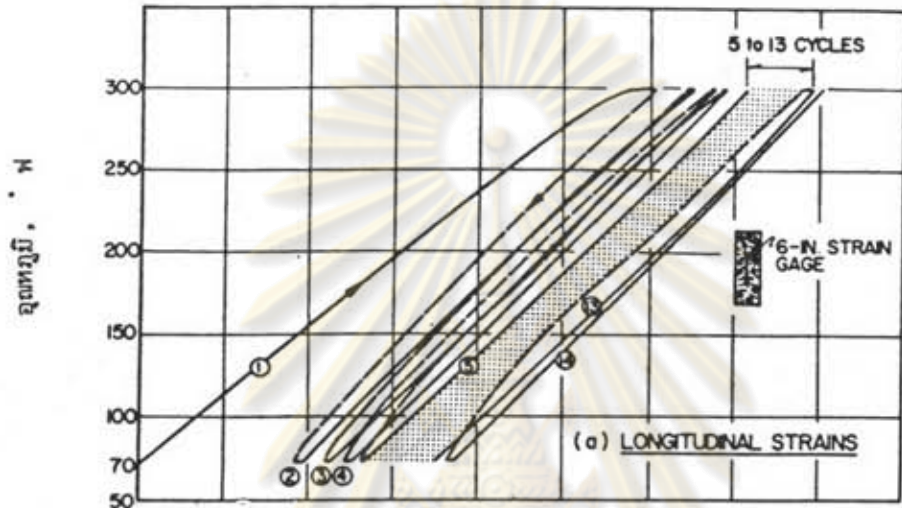
ขนาดตะแกรง	เปอร์เซ็นต์ส่วนละ เอียงกว่า
$\frac{1}{2}$ นิ้ว	98.7
$\frac{3}{8}$ นิ้ว	88.2
No.4	19.8
No.8	0

ตารางที่ 4.4 สัดส่วนผลของหินปูนขนาดโตสุด $\frac{3}{4}$ นิ้ว

ขนาดตะแกรง	เปอร์เซ็นต์ส่วนละ เอียงกว่า
$\frac{3}{4}$ นิ้ว	97.4
$\frac{1}{2}$ นิ้ว	29.6
$\frac{3}{8}$ นิ้ว	7.0
No.4	1.7
No.8	0

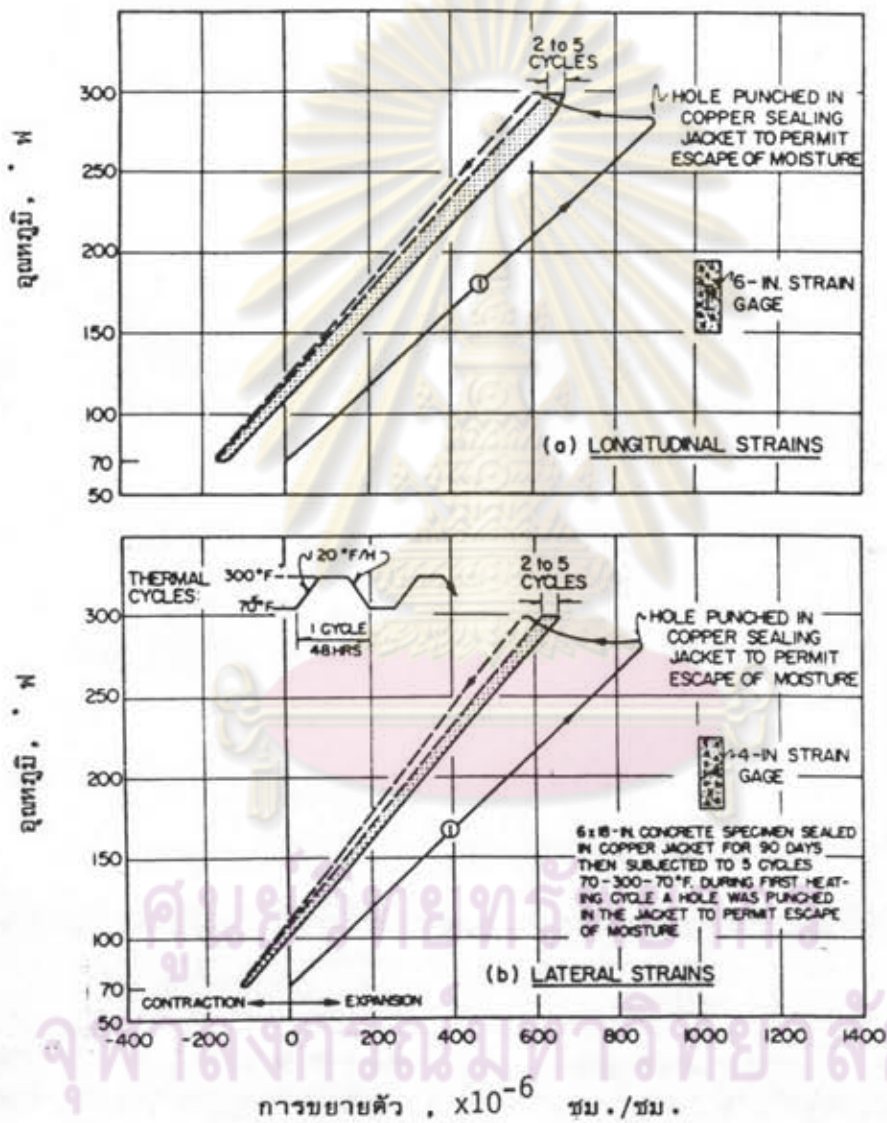


รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับอุณหภูมิ (1)

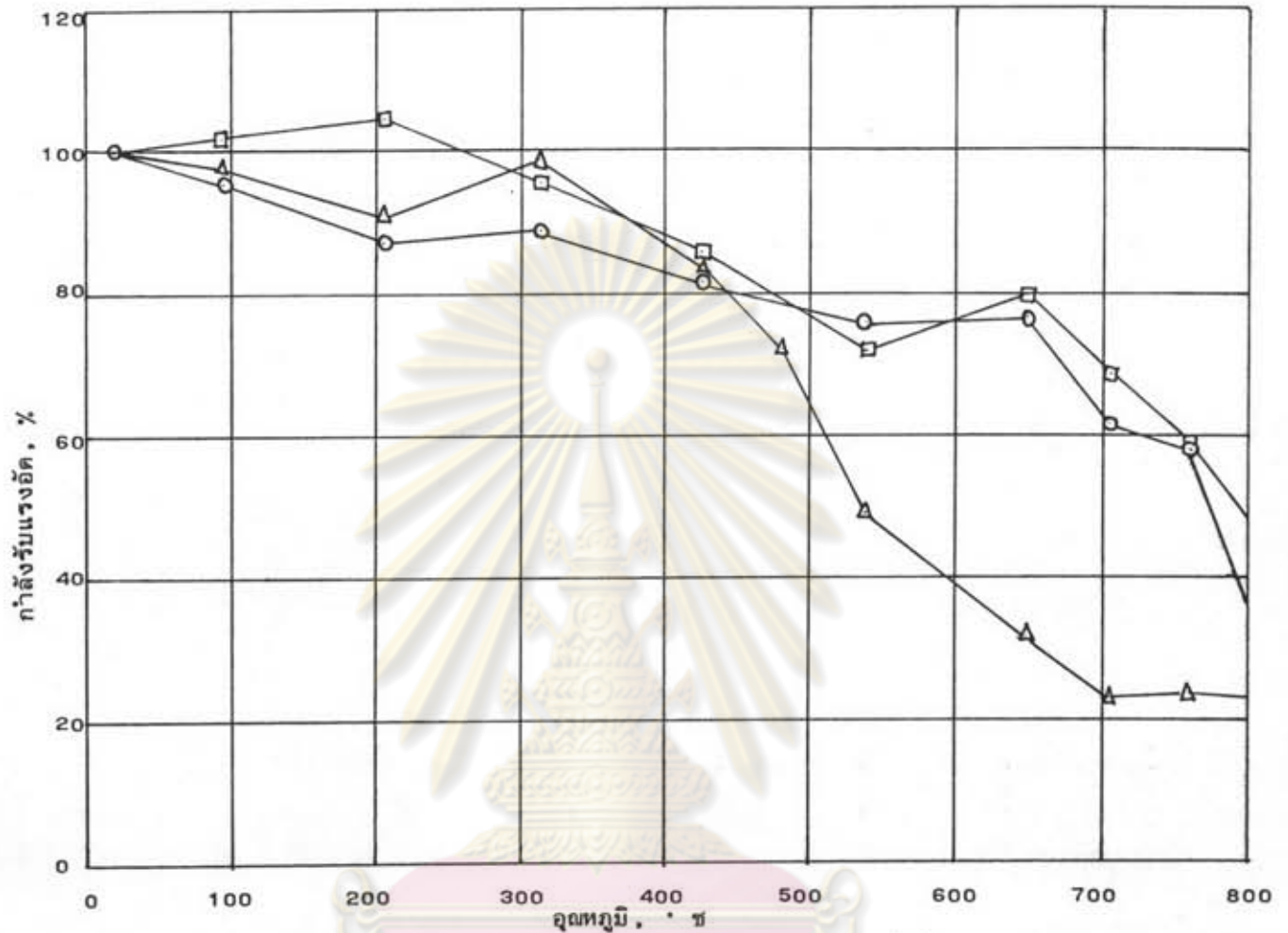


การขยายตัว, $\times 10^{-6}$ ซม./ซม.

รูปที่ 2.2 การขยายตัวของคอนกรีตที่ถูกปิดผนึก เมื่อมีวัฏจักรของอุณหภูมิ 21-149-21 °ซ (9)

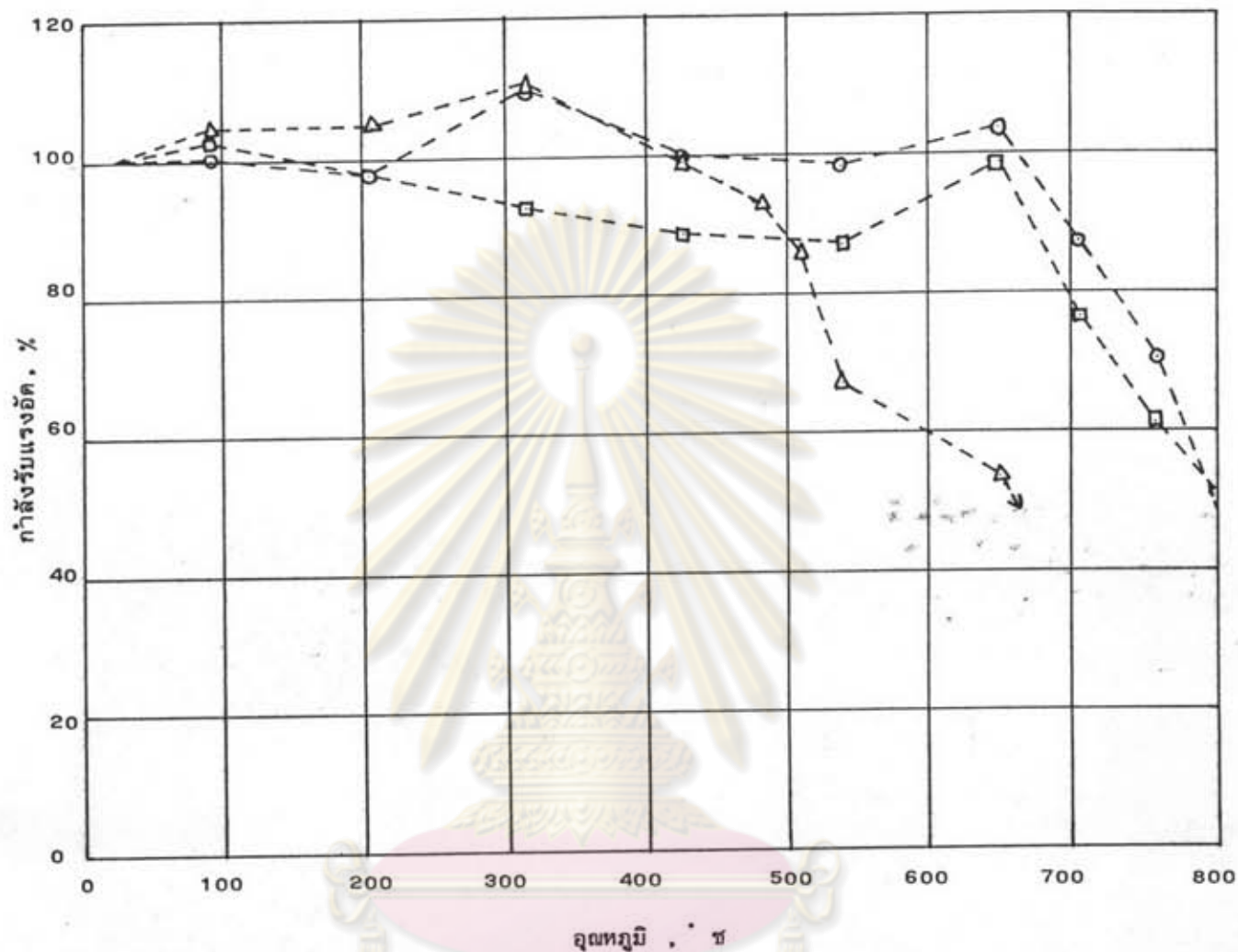


รูปที่ 2.3 การขยายตัวและการหดตัวของคอนกรีต เมื่อให้ความชื้น
 ระเหยออกได้หลังจากการเพิ่มอุณหภูมิครั้งแรก (๑)



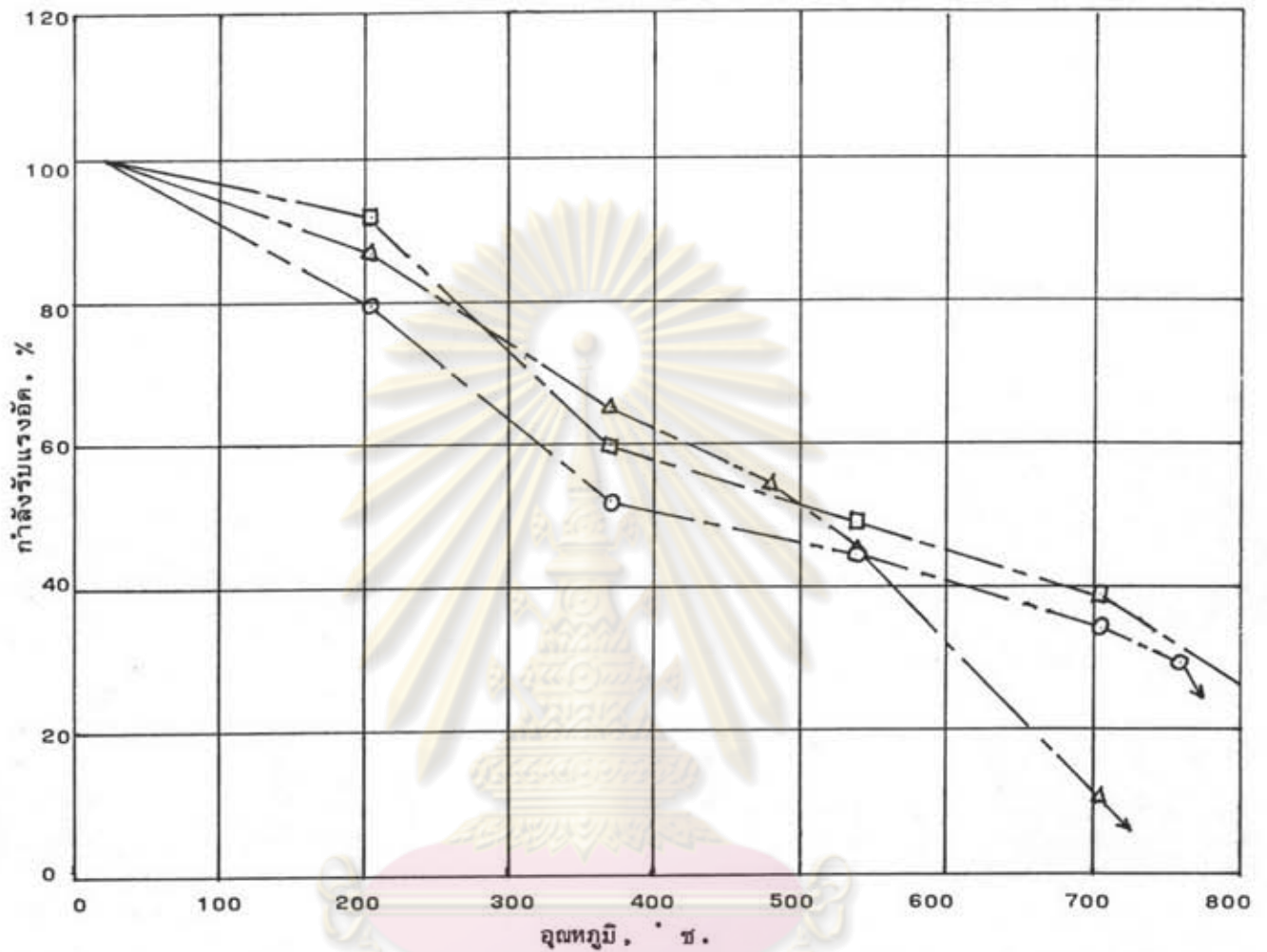
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต กับปุ๋ยหมัก⁽³⁾ โดยที่ไม่มีแรงอัดขณะเพิ่มปุ๋ยหมักและทดสอบกำลังที่ปุ๋ยหมักสูง

	ซีเมนต์: ทราย: ดิน	อัตราส่วน น้ำ/ซีเมนต์	มวลรวมหยาบ	หมายเหตุ
□	1 : 1.96 : 2.79 1 : 0.94 : 2.37	0.78 0.59	มวลเบา	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา
△	1 : 3.43 : 4.34 1 : 2.67 : 3.03	0.51 0.40	ซิลิเซียส	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา
○	1 : 3.61 : 4.58 1 : 2.74 : 3.14	0.55 0.42	คาร์บอนเนต	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา



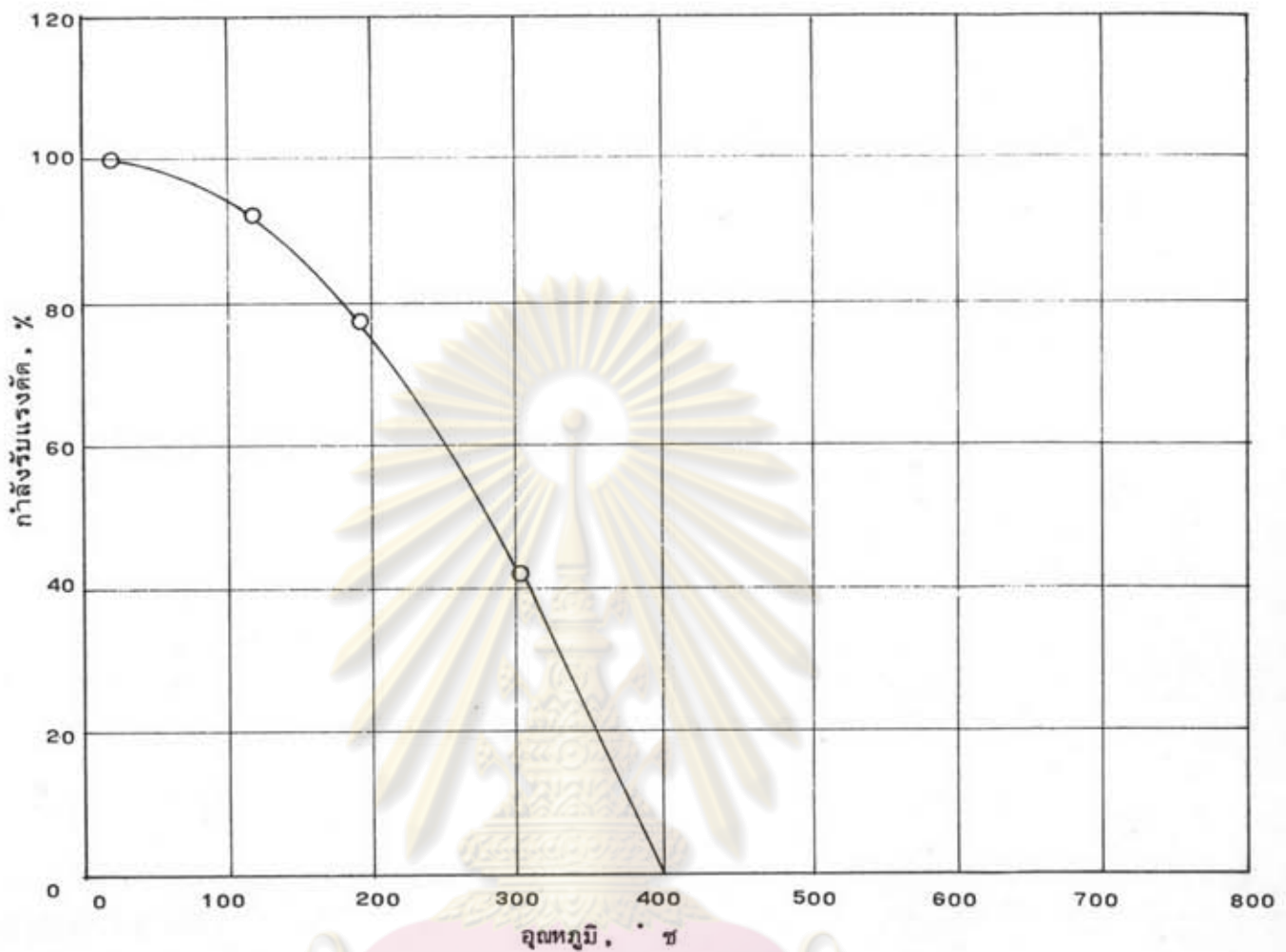
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกับอุณหภูมิ⁽³⁾ โดยใส่แรงอัด 40 เปอร์เซ็นต์ของกำลังประลัยขณะ เพิ่มอุณหภูมิ และ ทดสอบกำลังที่อุณหภูมิสูง

	ซีเมนต์:ทราย:หิน	อัตราส่วน น้ำ/ซีเมนต์	มวลรวมหายาบ	หมายเหตุ
□	1: 1.96 : 2.79 1: 0.94 : 2.37	0.78 0.59	มวล เบา	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา
Δ	1: 3.43 : 4.34 1: 2.67 : 3.03	0.51 0.40	ซิลิเซียส	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา
○	1: 3.61 : 4.58 1: 2.74 : 3.14	0.55 0.42	คาร์บอน เบน	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกําลังรับแรงอัดของคอนกรีตกับอุณหภูมิ⁽³⁾ โดยที่ไม่มีแรงอัดขณะเพิ่มอุณหภูมิและทดสอบกําลังที่อุณหภูมิห้อง

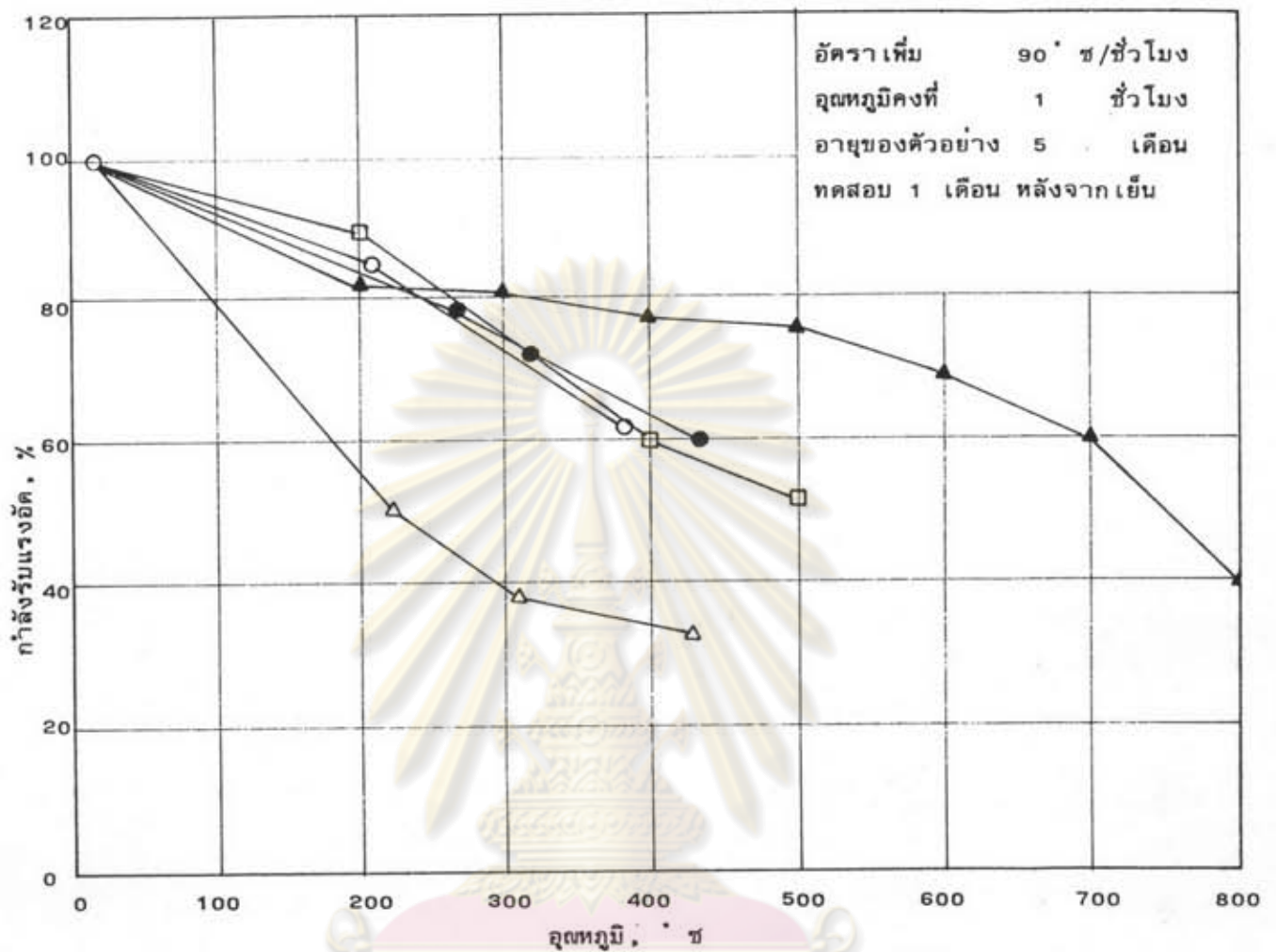
	ซีเมนต์: ทราย: หิน	อัตราส่วนน้ำ/ซีเมนต์	มวลรวมหยาบ	หมายเหตุ
□	1:1.96:2.79 1:0.94:2.37	0.78 0.59	มวลเบา	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา
Δ	1:3.43:4.34 1:2.67:3.03	0.51 0.40	ซิลิเซียส	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา
○	1:3.61:4.58 1:2.74:3.14	0.55 0.42	คาร์บอน	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตและจุดทงุมิ (2)

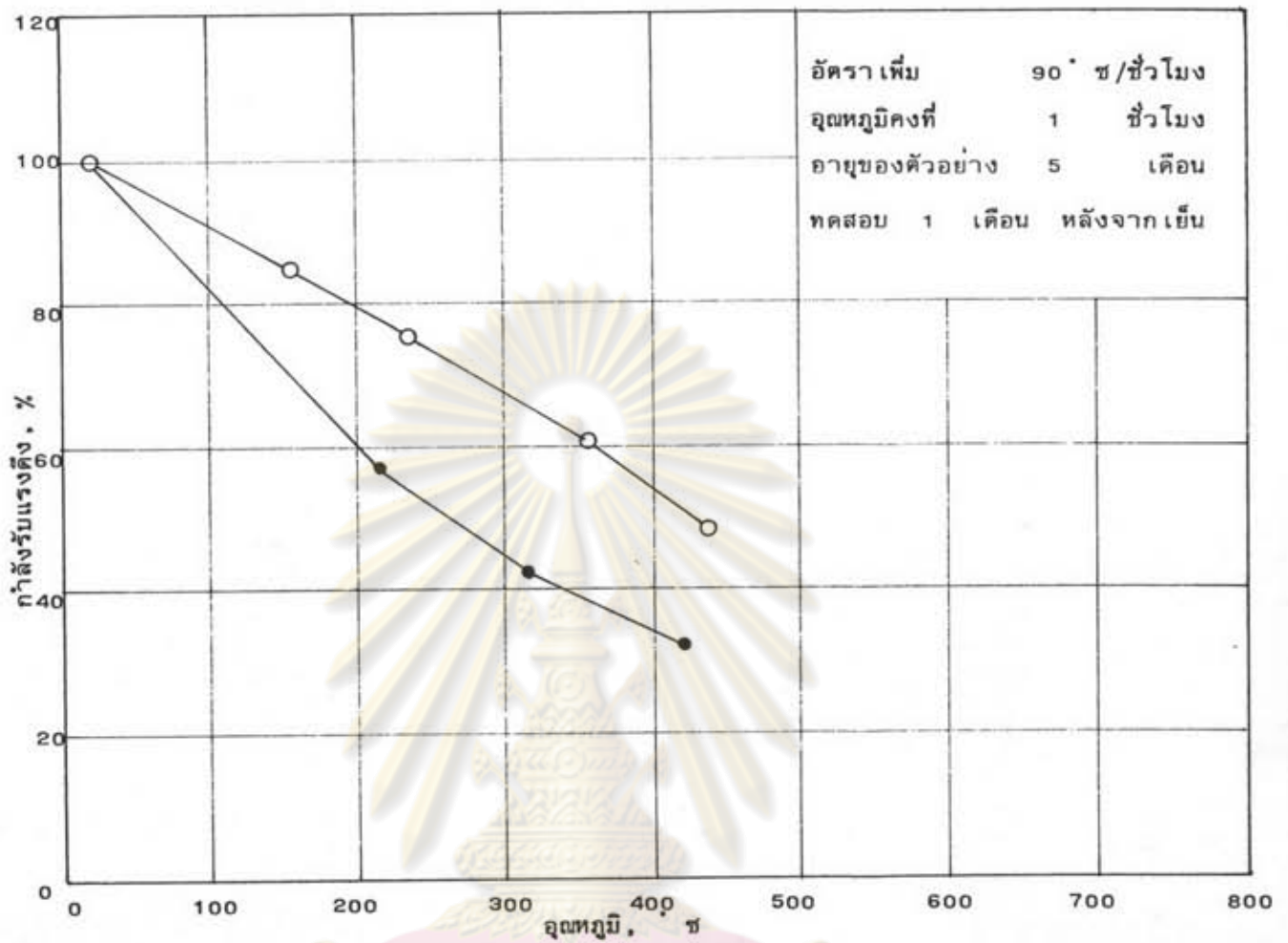
	ซีเมนต์:ทราย:หิน	อัตราส่วน น้ำ / ซีเมนต์	มวลรวมหยาบ	หมายเหตุ
○	1 : 2.50 : 4.32	0.56	หินกรวด	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



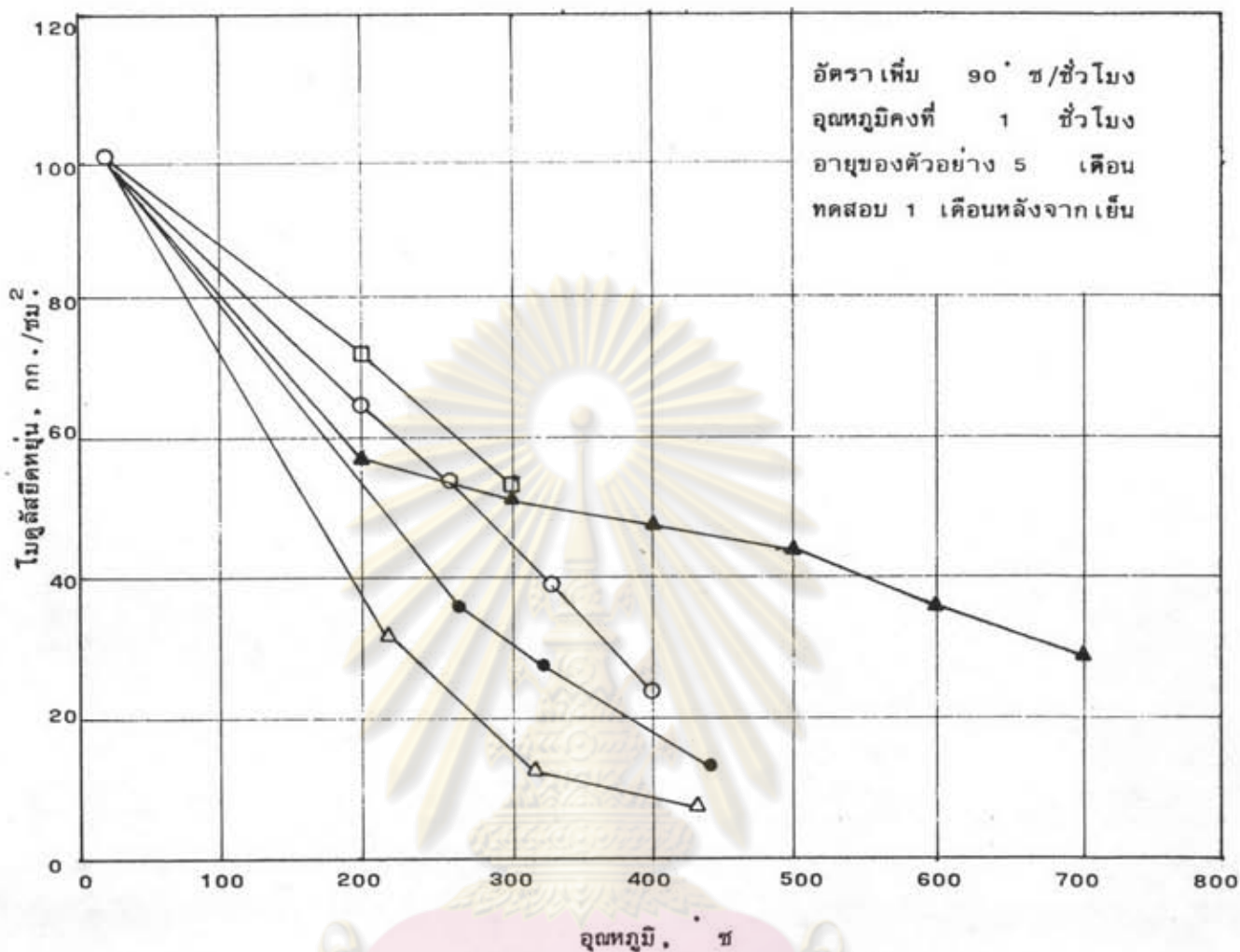
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต กับ จุดทงุมิ⁽⁴⁾

	ซีเมนต์ : ทราย : หิน	อัตราส่วน น้ำ/ซีเมนต์	การยุบตัว (ซม.)	มวลรวมหาย	หมายเหตุ
○	1 : 2.0 : 2.5 1 : 2.3 : 2.7	0.60 0.70	15 15	หินทราย หินทราย	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา
△	1 : 2.0 : 2.5	0.60	15	หินทราย	
□	1 : 1.8 : 3.8	0.65	15	แอนดิสไลท์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา
●	1 : 1.9 : 2.85	0.65	15	หินปูน	
▲	ซีเมนต์ 350 กก. ทราย 0.62 ม. ² หิน 0.62 ม. ²	0.58	16	ห้บมิต	



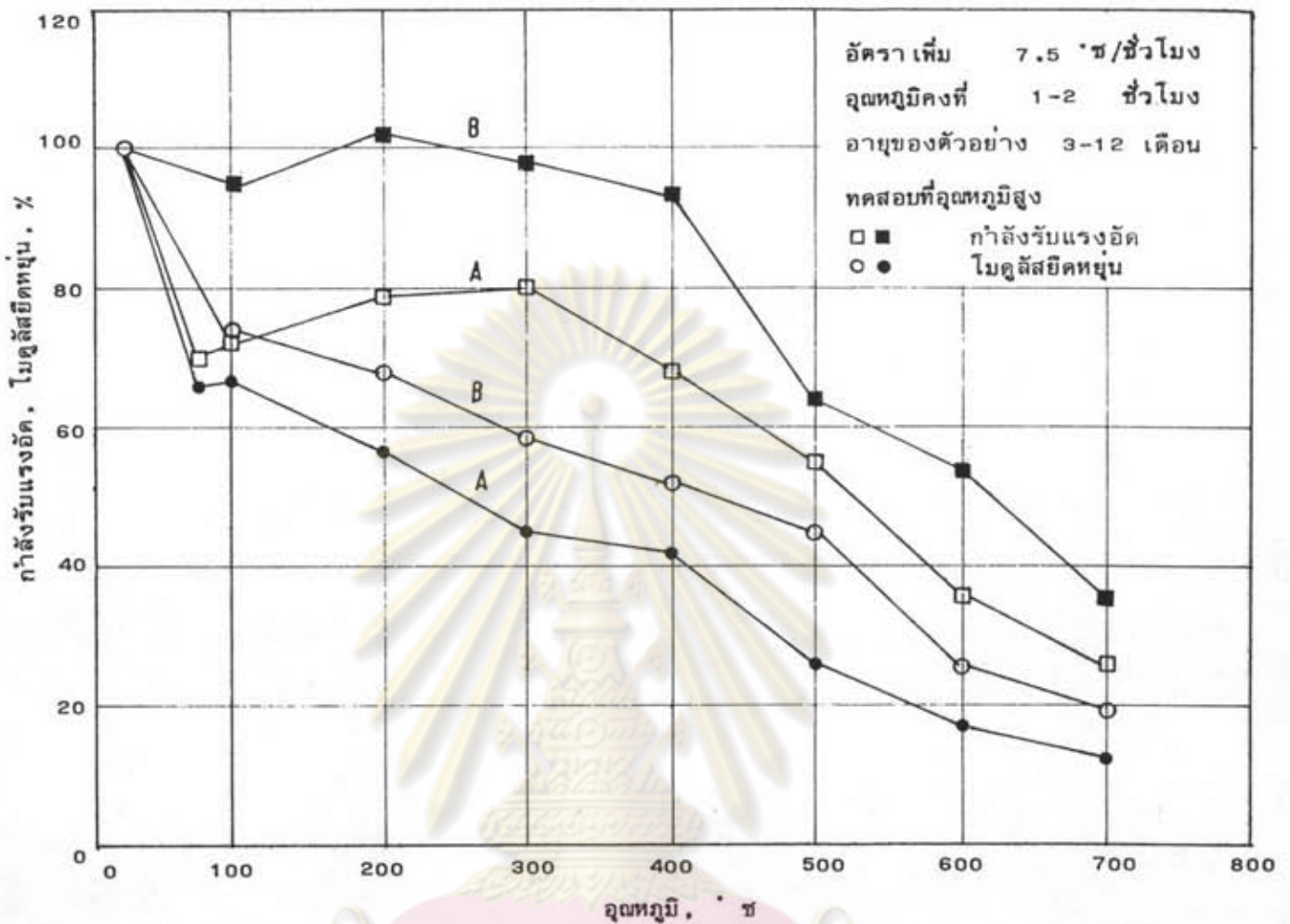
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต กับลูกรูมี้⁽⁴⁾

	ซีเมนต์:ทราย:หิน	อัตราส่วน น้ำ/ซีเมนต์	ความขุบตัว (ชม.)	มวลรวมหยาบ	หมายเหตุ
○	1 : 2.0 : 2.5	0.60	15	หินทราย	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา
	1 : 2.3 : 2.5	0.70	15	หินทราย	
●	1 : 1.9 : 2.85	0.65	15	หินปูน	



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกับอุณหภูมิ (4)

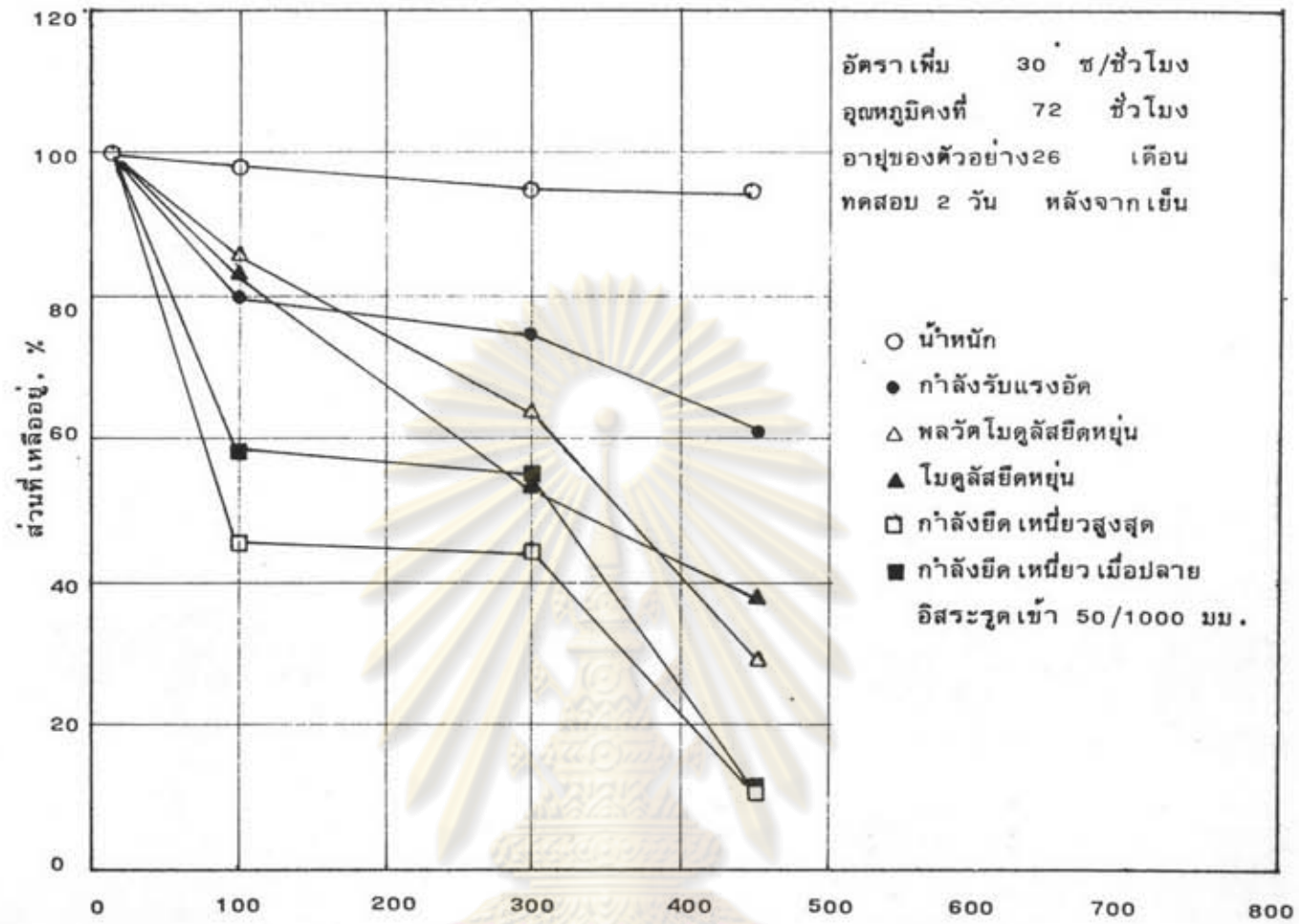
	ซีเมนต์:ทราย:หิน	อัตราส่วน น้ำ/ซีเมนต์	ความยุบตัว (ซม.)	มวลรวมทราย	หมายเหตุ
○	1 : 2.0 : 2.5 1 : 2.3 : 2.7	0.60 0.70	15 15	หินทราย หินทราย	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา
△	1 : 2.0 : 2.5	0.60	15	หินทราย	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์มีอลูมิน่าสูง
□	1 : 1.8 : 3.8	0.65	15	แอนดิไซท์	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา
●	1 : 1.9 : 2.85	0.65	15	หินปูน	
▲	ซีเมนต์ 350 กก ทราย 0.62 ม. ² หิน 0.62 ม. ²	0.58	16	พัมมิส	



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต กับอุณหภูมิ (4)

	ซีเมนต์: ทราย: หิน	อัตราส่วน น้ำ/ซีเมนต์	ความยวบยัว (ซม.)	มวลรวมหยาบ	หมายเหตุ
A	1 : 2.8 : 2.9	0.70	15	หินกรวด	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา
B	1 : 1.9 : 2.0	0.45	5.9		

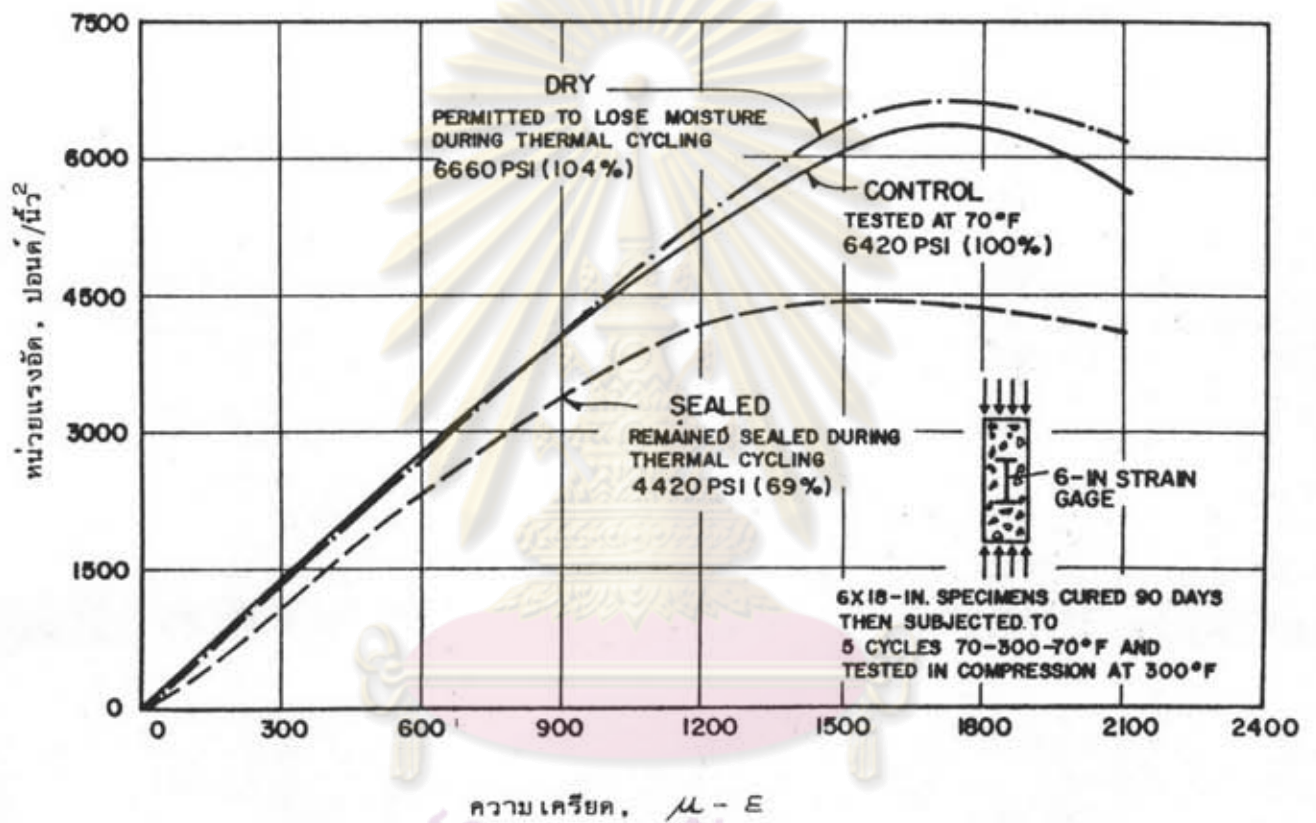
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก กำลังรับแรงอัด โมดูลัสยืดหยุ่น กำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีตกับอุณหภูมิ (4)

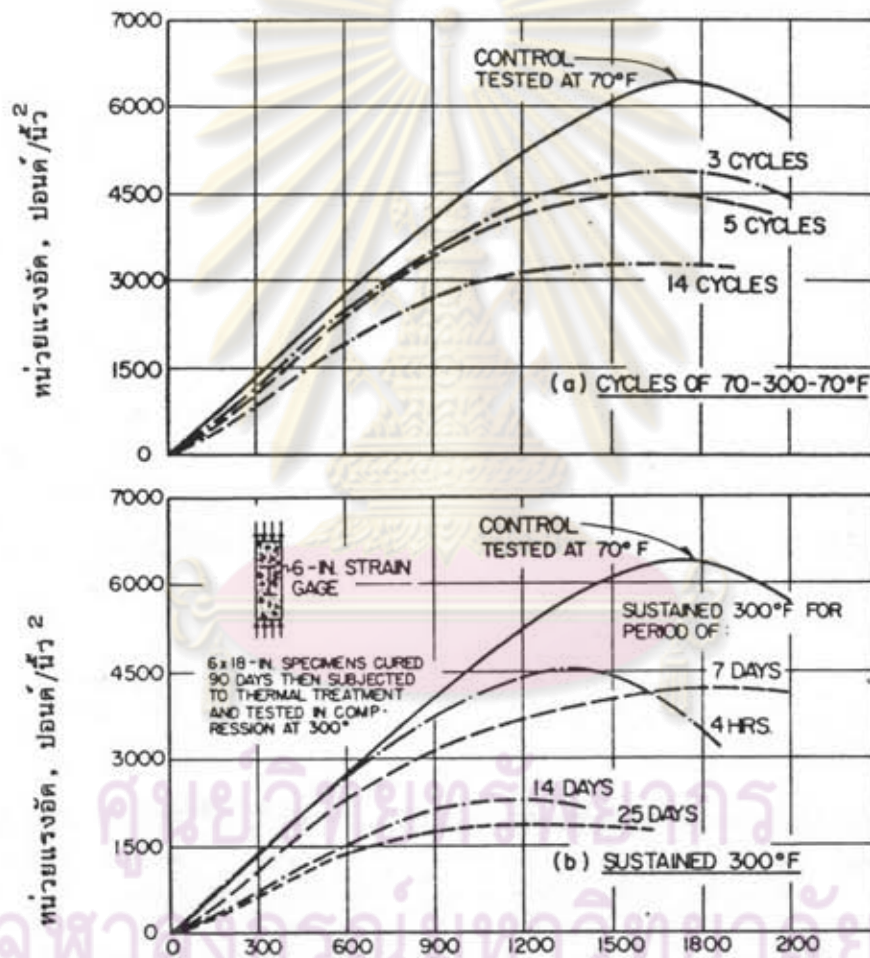
ซีเมนต์: ทราย: หิน	อัตราส่วนน้ำ/ซีเมนต์	ความขุบตัว (ซม)	มวลรวมหยาบ	หมายเหตุ
1 : 1.88 : 3.06	0.527	18.5	หินกรวด	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

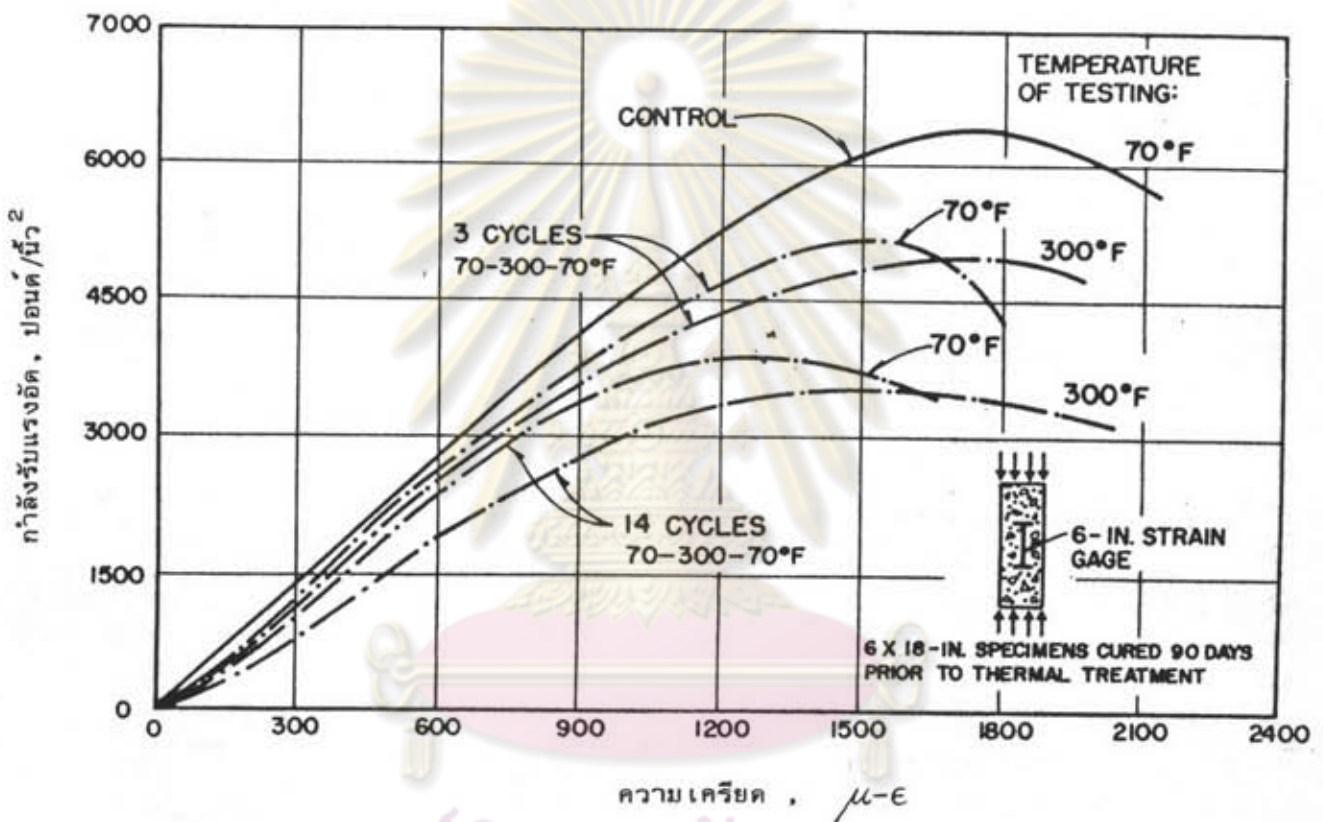


รูปที่ 2.13 ผลของสภาพความชื้นของคอนกรีตต่อหน่วยแรงและความเครียดที่ 149" ช (หลังจากเพิ่มและลดอุณหภูมิ 21-149-21" ช จำนวน 5 รอบ)⁽⁹⁾

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

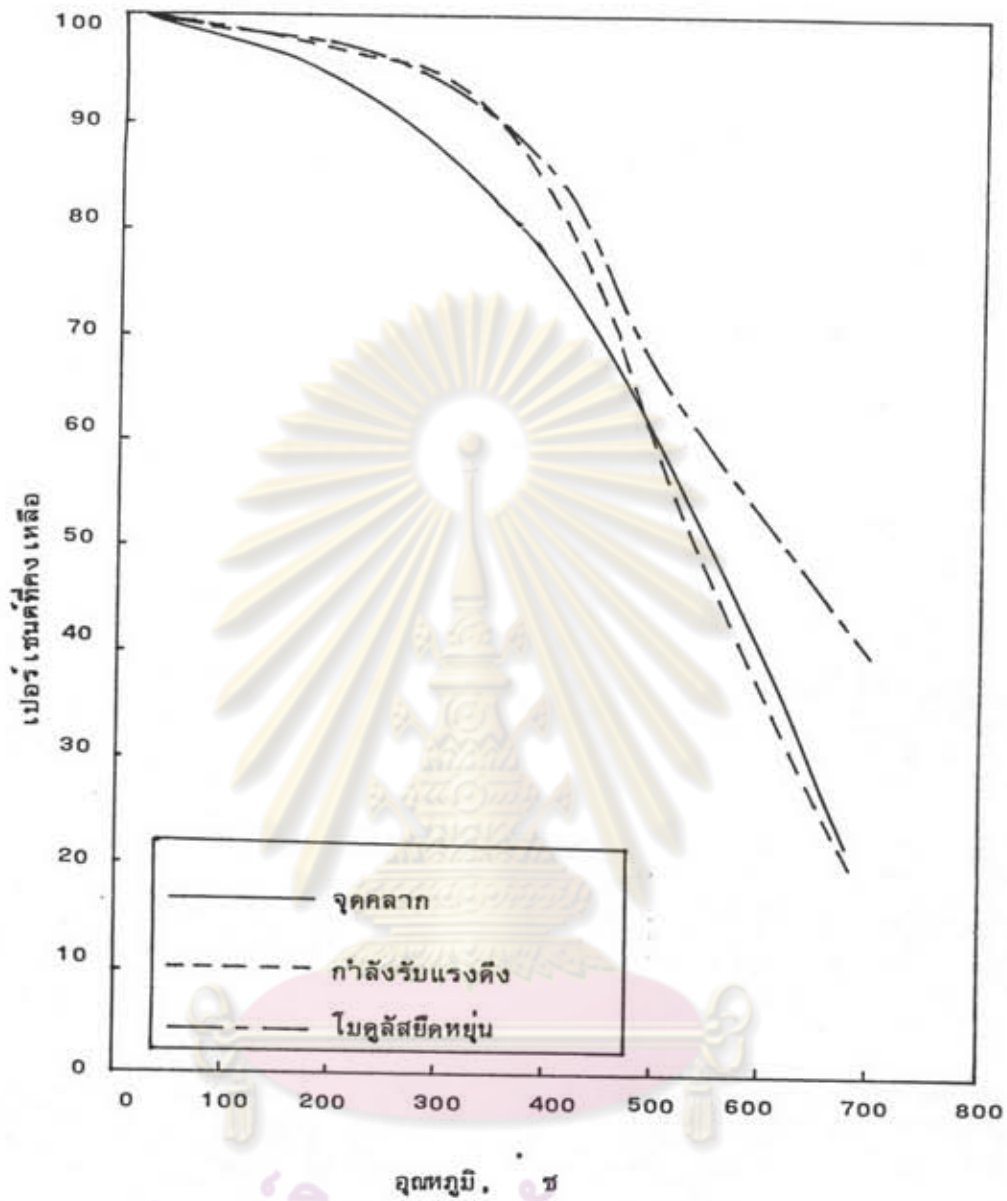


รูปที่ 2.14 อิทธิพลของการให้อุณหภูมิต่อหน่วยแรงและความเครียดของก้อนคอนกรีตที่ถูกปิดผนึก ที่ 149° ซ.⁽⁹⁾



รูปที่ 2.15 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของก้อนคอนกรีตที่ถูกปิดผนึก (๑)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

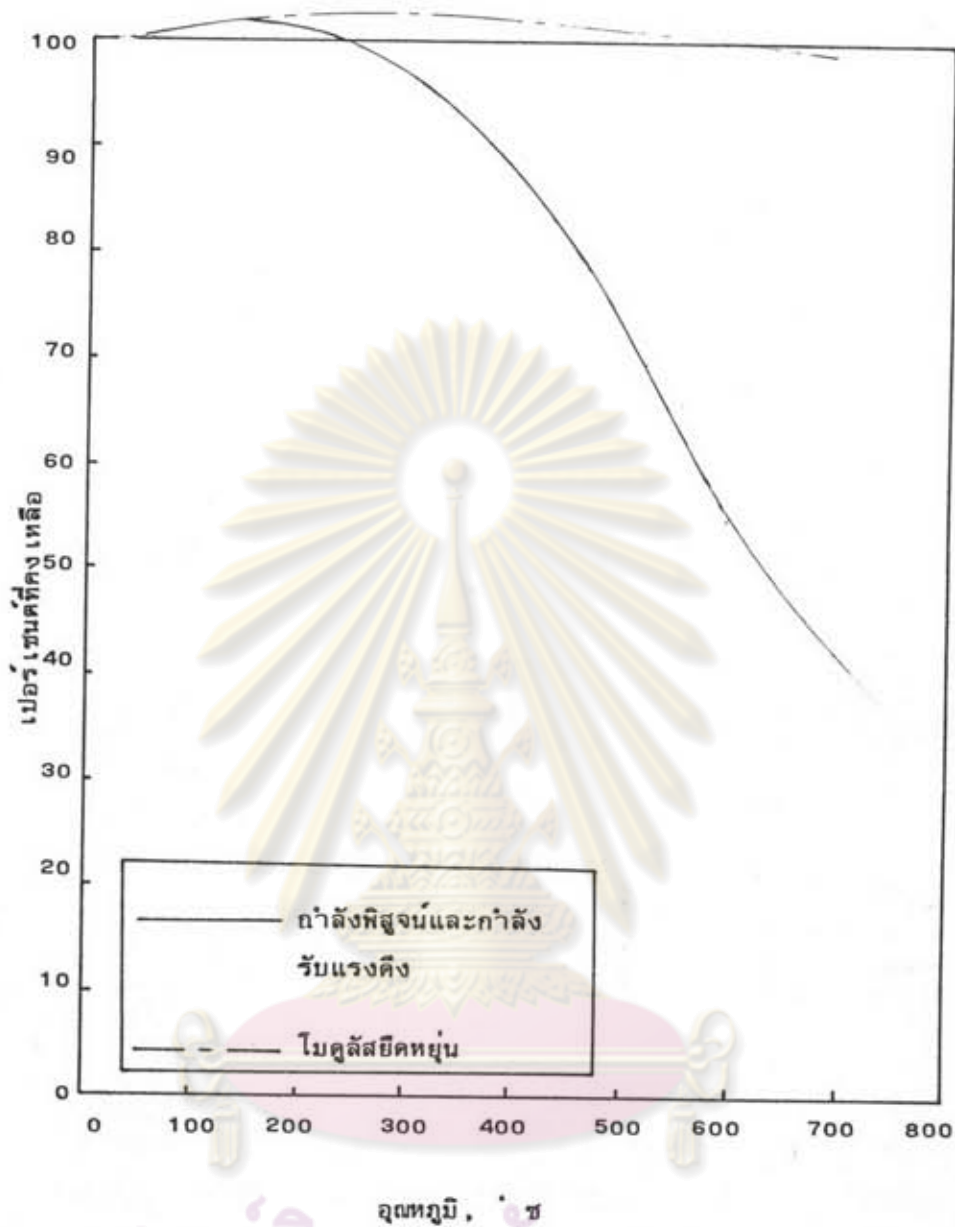


ศูนย์วิทยทรัพยากร

รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของ เอลีก เสริมธรรมคา กับอุณหภูมิ (16)

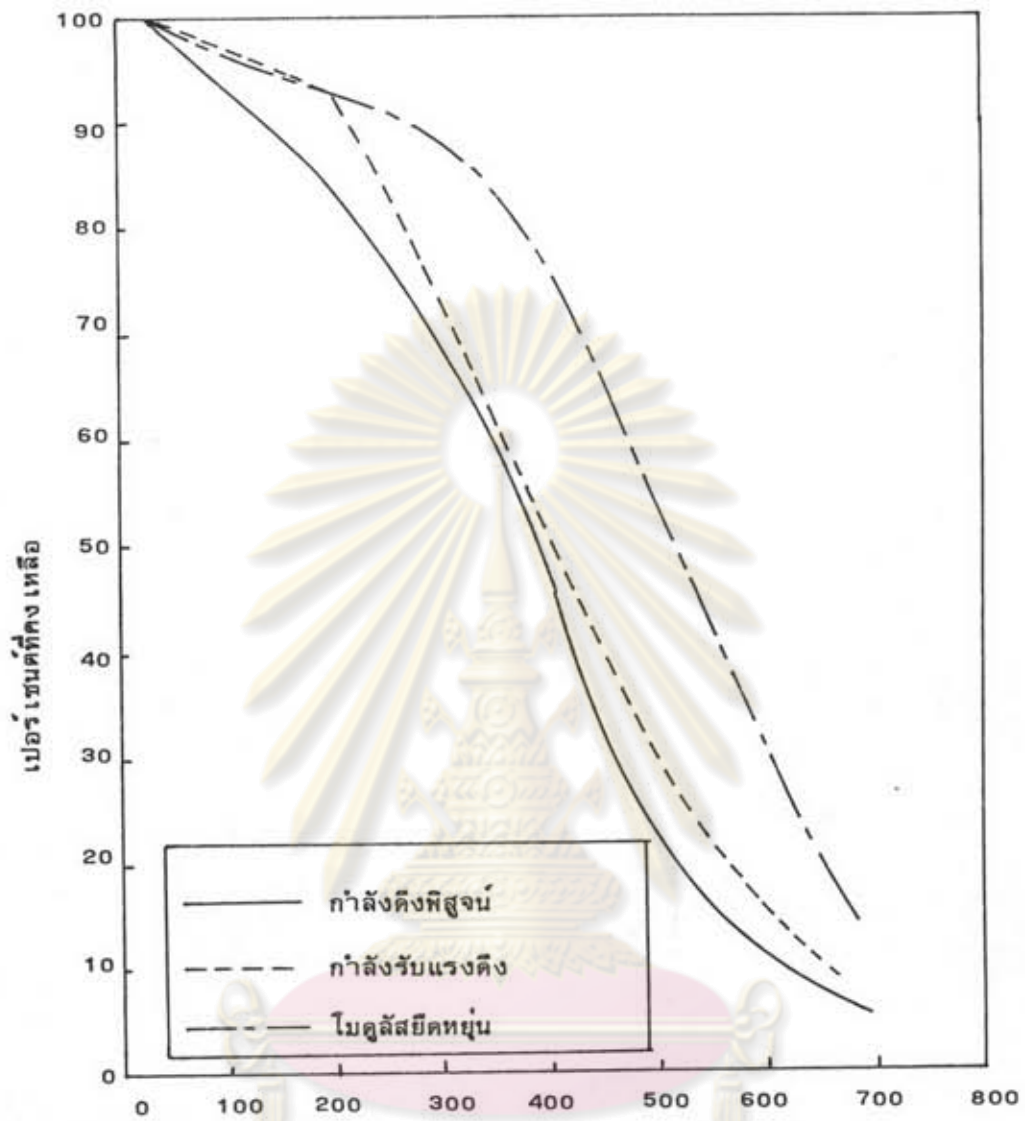
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ชิ้นส่วนถูกทำให้ร้อนขึ้น แล้วแช่ไว้ 30 นาที จากนั้นทดสอบทันทีที่อุณหภูมิสูง)



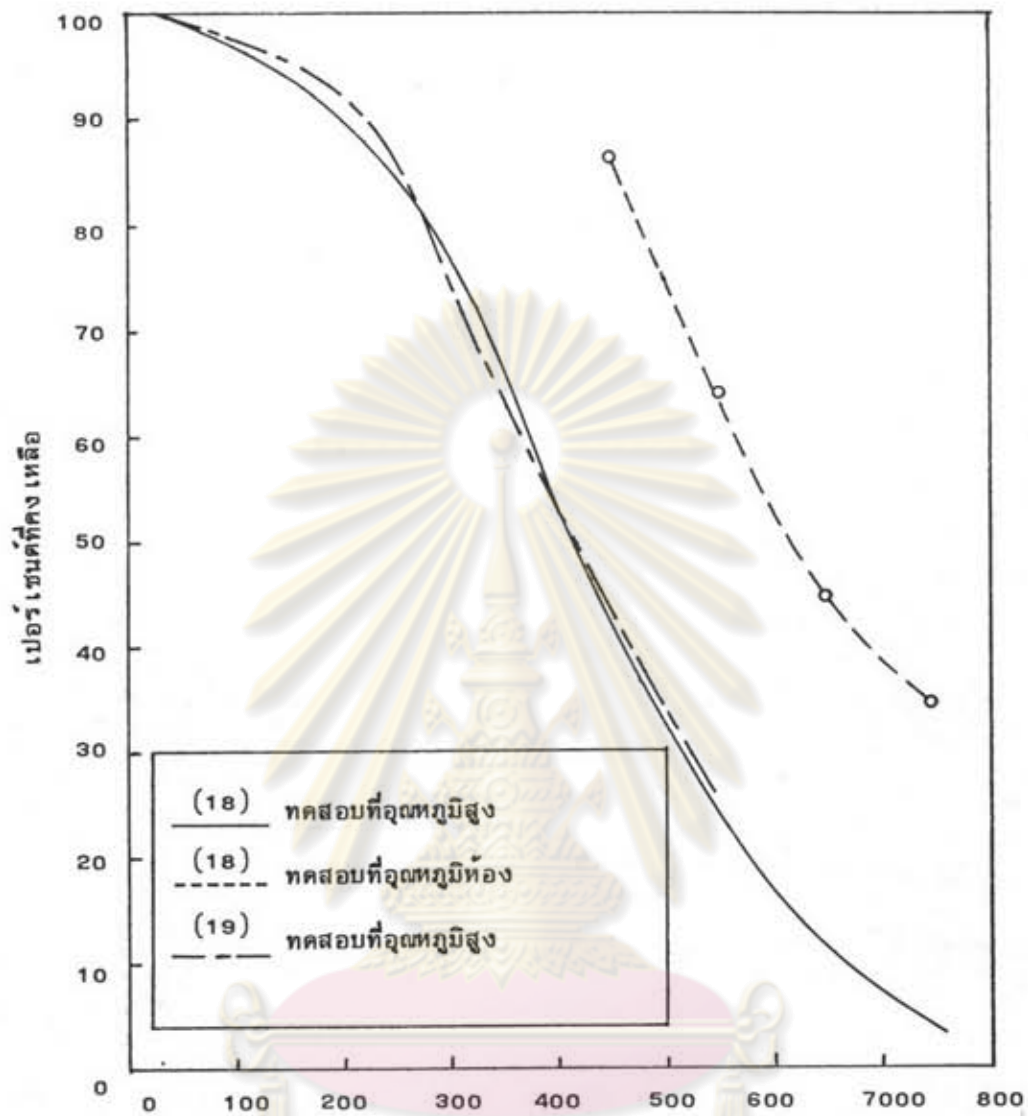
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของเหล็ก เสริมอัดแรงกับอุณหภูมิ⁽⁶⁾

(ชิ้นส่วนถูกทำให้ร้อนขึ้น แล้วแช่ไว้ 30 นาที จากนั้นปล่อยให้เย็น แล้วทดสอบที่อุณหภูมิห้อง)



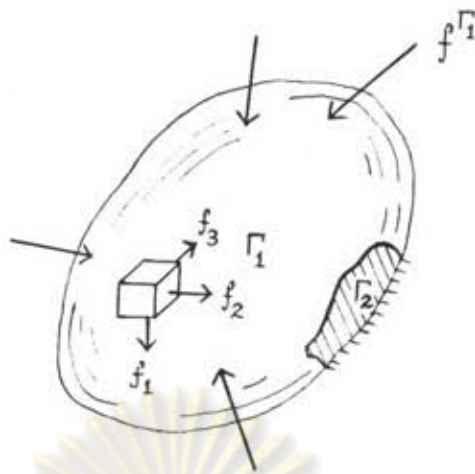
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของเหล็ก เสริมอัดแรงกับอุณหภูมิ⁽¹⁶⁾
 (ชิ้นส่วนถูกทำให้ร้อนขึ้น แล้วแช่ไว้ 30 นาที จากนั้นทดสอบ
 ทันทีที่อุณหภูมิสูง)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

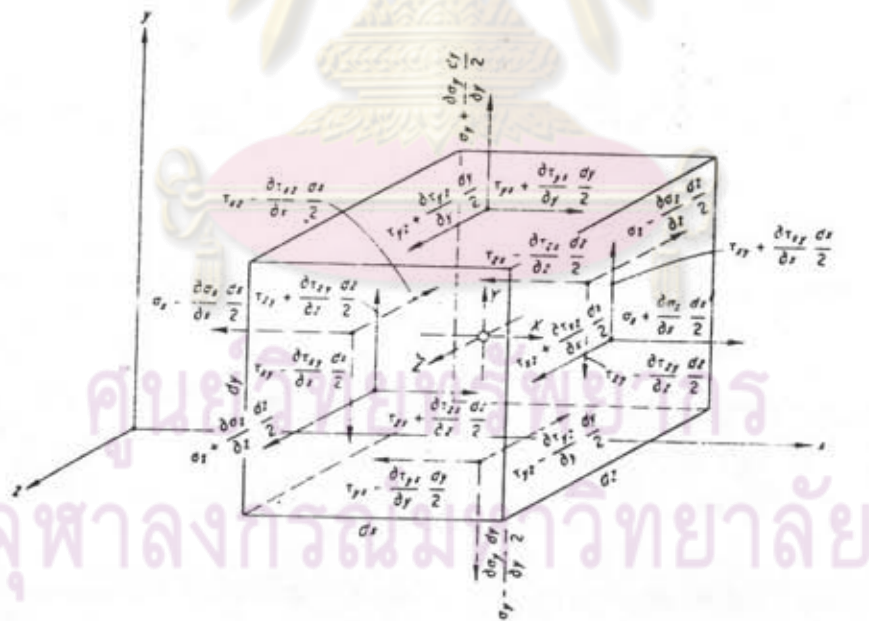


ศูนย์วิทยุตำรวจ

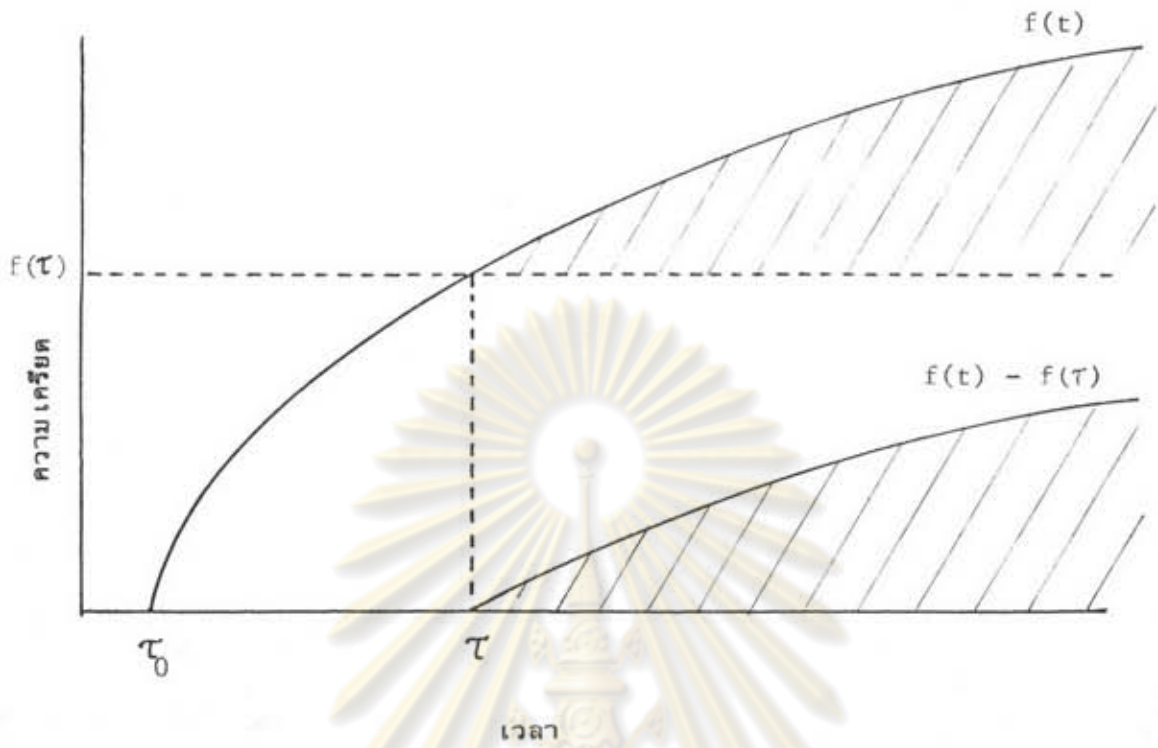
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของ เหล็ก เสริมอัดแรงกับจุดทศนิยม⁽¹⁶⁾
 (ชิ้นส่วนถูกทำให้ร้อนขึ้น แล้วแช่ไว้ จากนั้นทดสอบที่จุดทศนิยมสูง
 หรือปล่อยให้ เย็นลงแล้วทดสอบที่จุดทศนิยมห้อง)



รูปที่ 3.1 วัตถุ 3 มิติใด ๆ ภายใต้แรงกระทำ

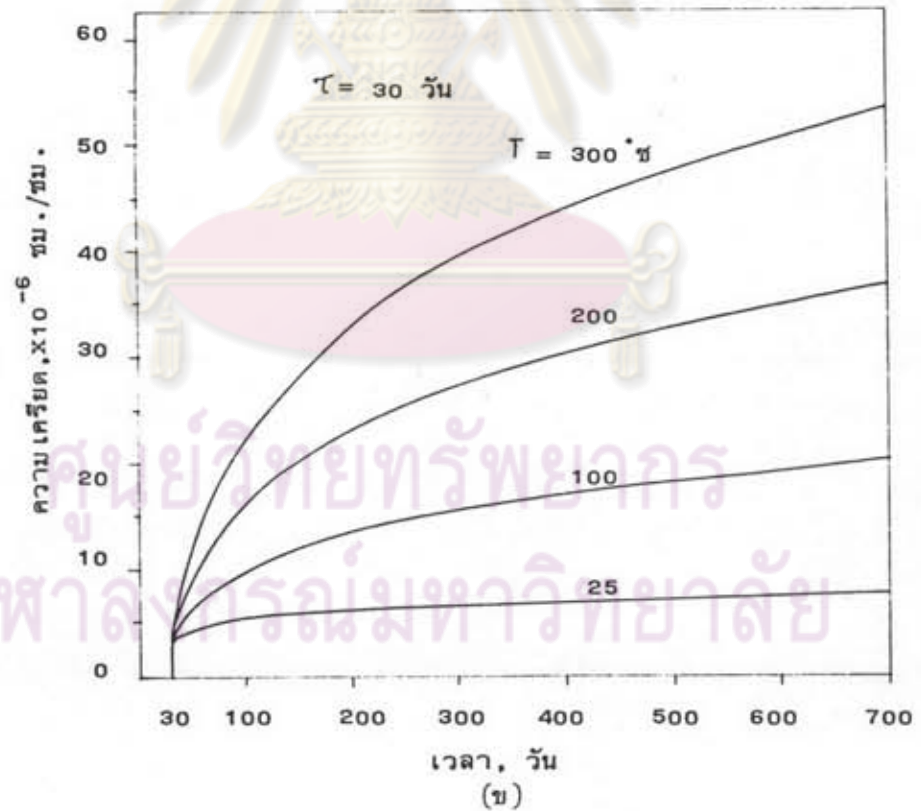
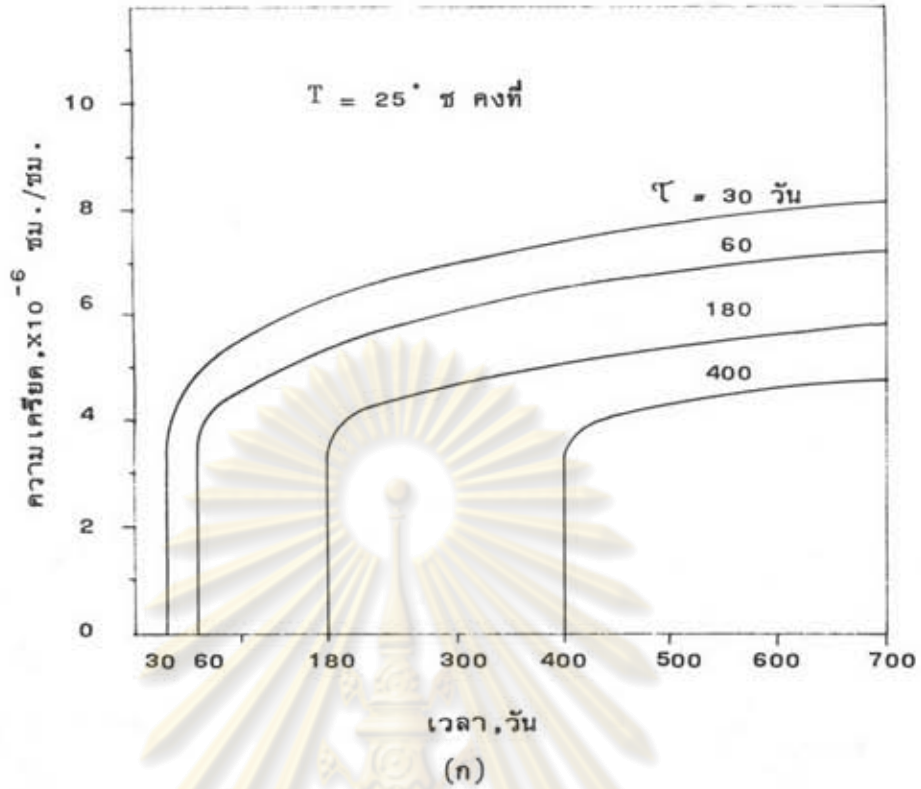


รูปที่ 3.2 สภาวะสมดุลของอนุภาค ที่จุดใด ๆ



รูปที่ 3.3 ฟังก์ชันความเครียดซึ่งไม่คืนกลับ ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

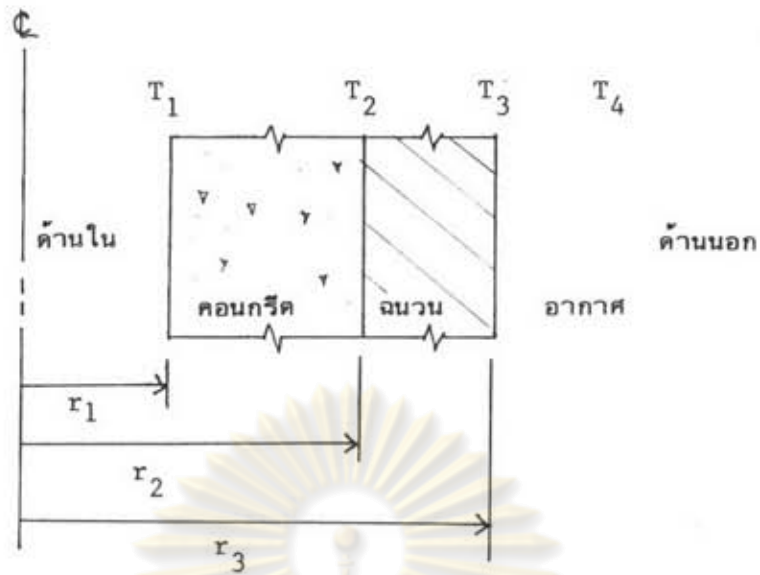


รูปที่ 3.4 ครีพคอมไพลแอนซ์ที่ใช้ในการวิจัยนี้

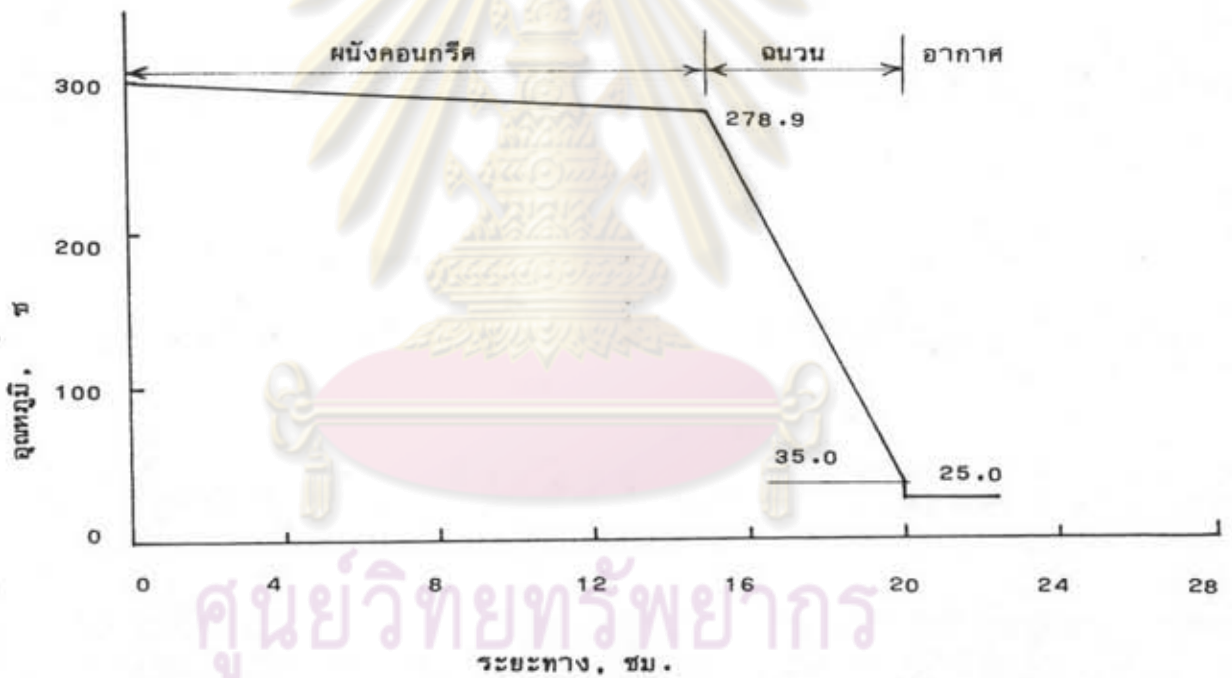
$$J(T, t, \tau) = \frac{1}{300000} + \frac{T}{25} \left[46.2 \times 10^{-6} (t^{0.025} - \tau^{0.025}) \right] + 0.638 \times 10^{-6} \left\{ 1 - \exp \left\{ -22.4 \times 10^6 (46.2 \times 10^{-6} (t^{0.025} - \tau^{0.025})) \right\} \right\}$$

(ก) แสดงฟังก์ชันสำหรับอุณหภูมิคงที่ 25°C เซลเซียส

(ข) แสดงฟังก์ชันสำหรับเวลาเริ่มต้นใส่แรงกระทำที่ 30 วัน



รูปที่ 4.1 รูปตัดขวางผนังคอนกรีตและฉนวน



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.2 แสดงการลดของอุณหภูมิตามความหนาของผนังและฉนวน จากการคำนวณ⁽²³⁾

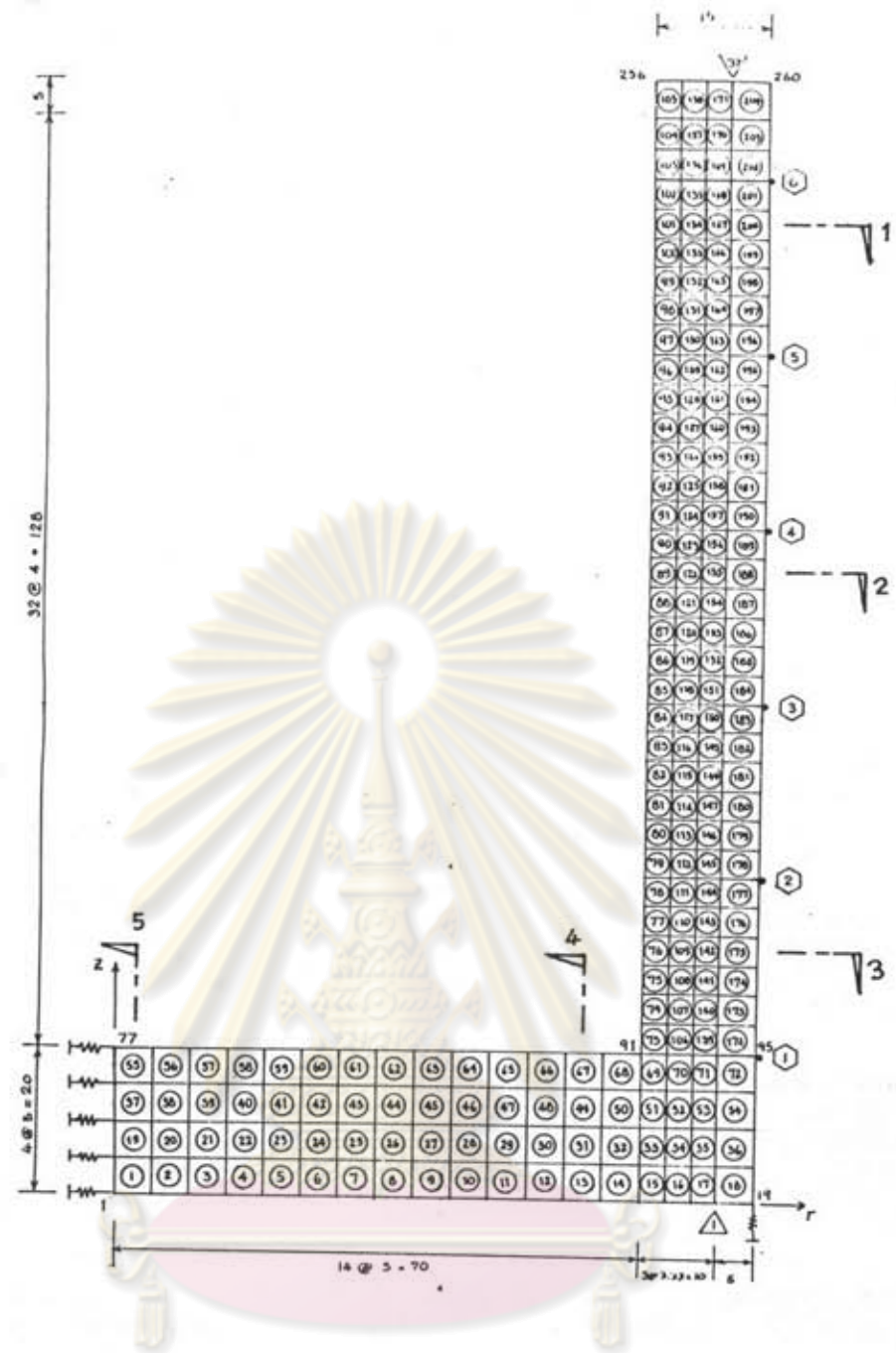
ความหนาของผนัง เท่ากับ 0.15 เมตร

คอนกรีต $E = 30,000 \text{ กก./ซม.}^2$, $\nu = 0.15$, $\alpha = 0.00001 / ^\circ \text{ซ}$

$$k_c = 1.2 \text{ กิโลแคลอรี/ม.-ซม.-}^\circ \text{ซ}$$

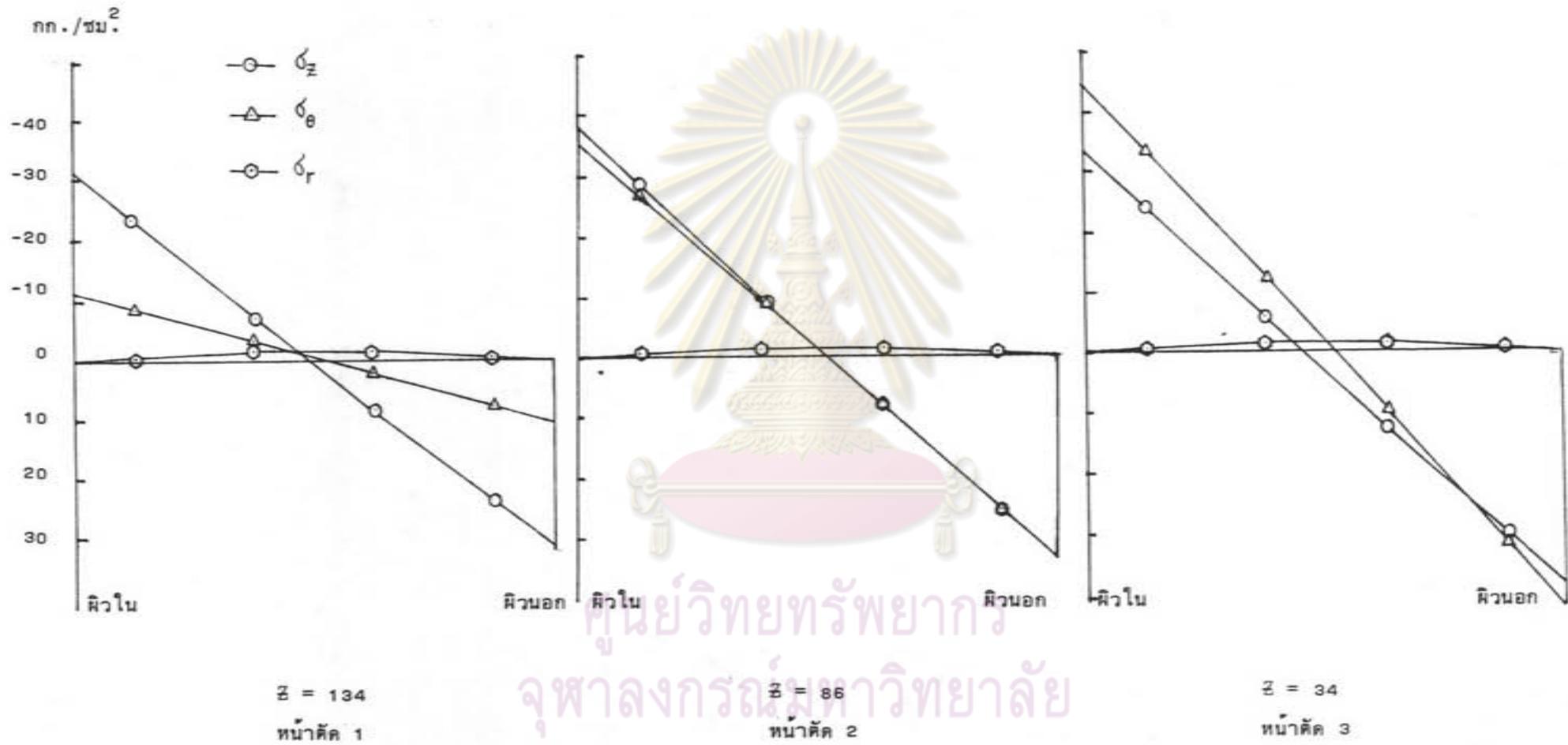
ฉนวน $k_f = 0.013 \text{ กิโลแคลอรี/ม.-ซม.-}^\circ \text{ซ}$

อากาศ $h_o = 10.8 \text{ กิโลแคลอรี/ม.}^2\text{-ซม.-}^\circ \text{ซ}$



ศูนย์วิทยทรัพยากร

รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างจำลองของถังทดลอง ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 4.4 การกระจายของหน่วยแรงที่หน้าตัด 1, 2, 3 บนผนัง
 เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิ วิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

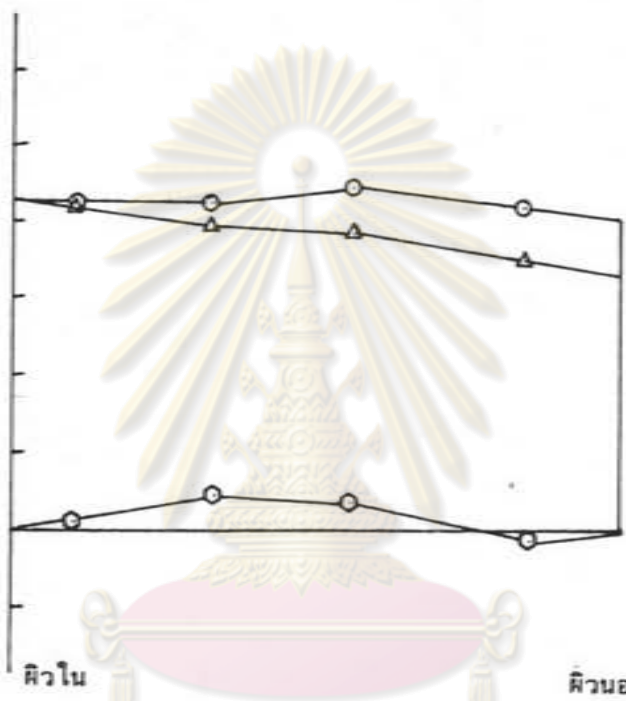
กก./ซม.²

-70
-60
-50
-40
-30
-20
-10
0
10

○ σ_z
△ σ_θ
○ σ_r

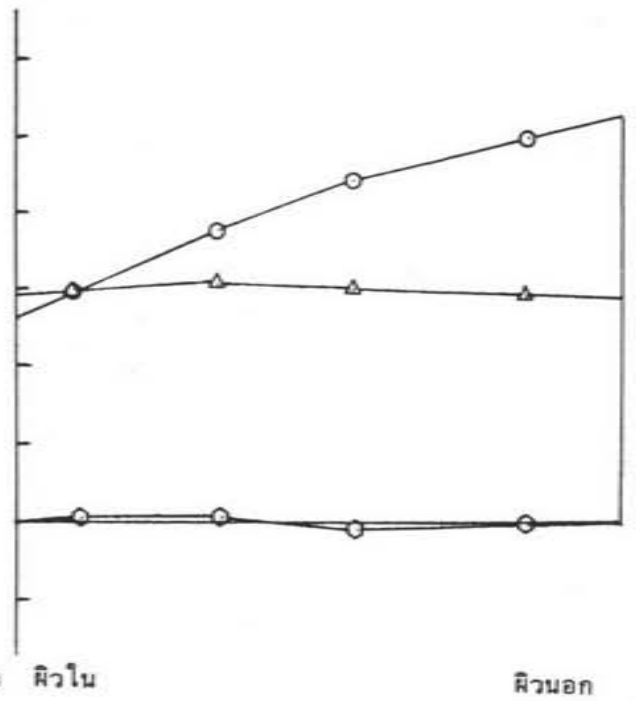
ผิวใน

ผิวนอก



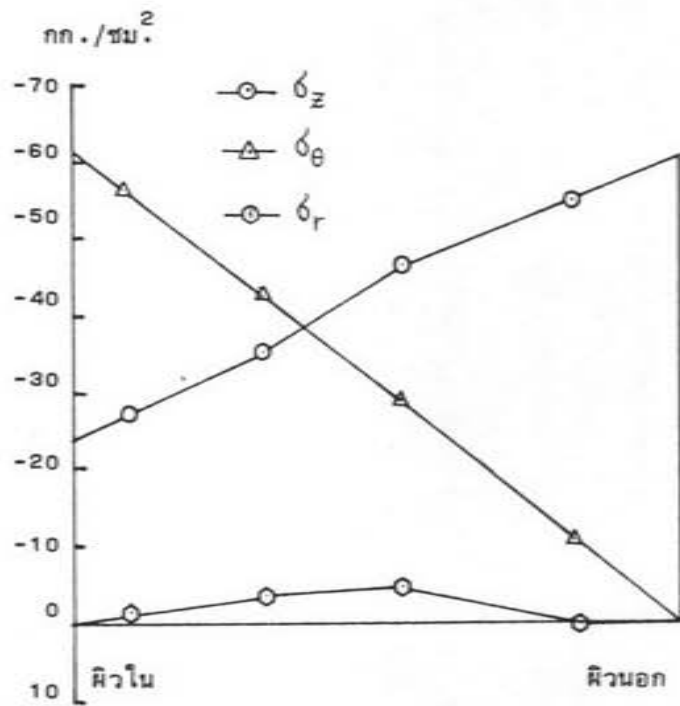
$\Sigma = 134$
หน้าตัด 1

ศูนย์วิทยุแพทยากร
Σ = 86
หน้าตัด 2

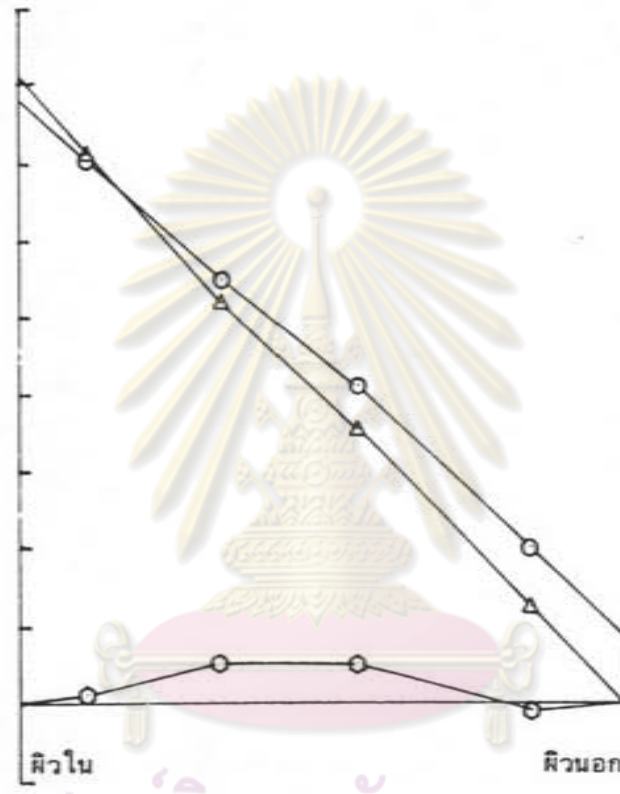


$\Sigma = 34$
หน้าตัด 3

รูปที่ 4.5 การกระจายของหน่วยแรงที่หน้าตัด 1, 2, 3 บนผนัง
เนื่องจากการอัดแรง วิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

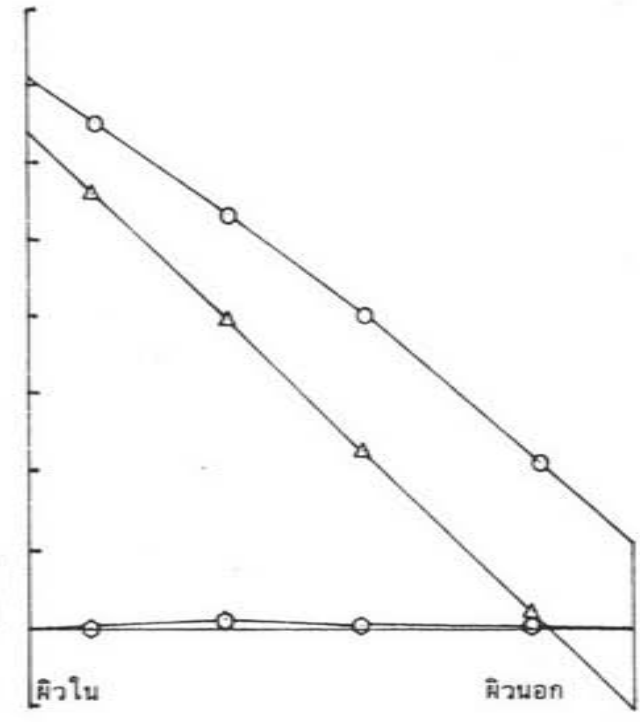


z = 134
 หน้าตัด 1



ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

z = 86
 หน้าตัด 2



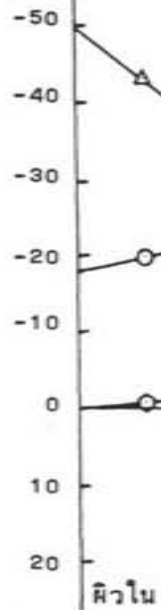
z = 34
 หน้าตัด 3

รูปที่ 4.6 การกระจายของหน่วยแรงที่หน้าตัด 1, 2, 3 บนผนัง

เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิและการอัดแรง วิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอ เลเมนต์

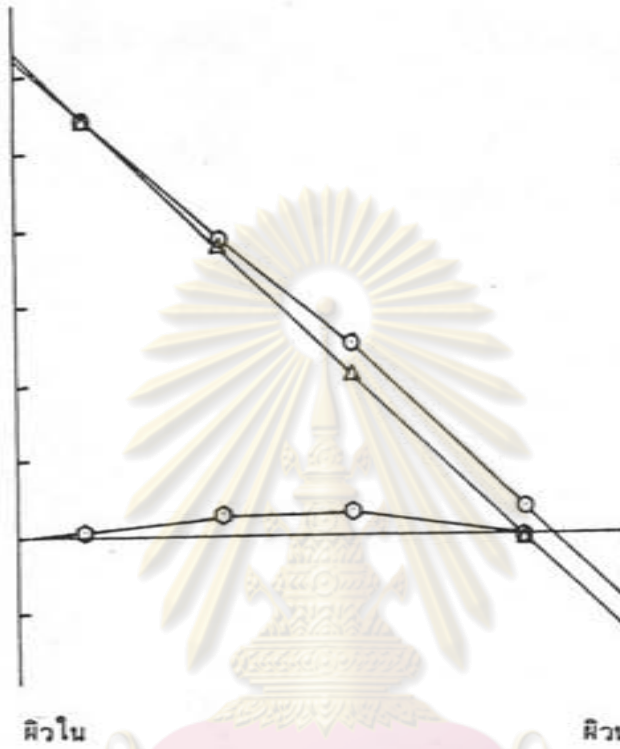
กก./ซม.²

○ σ_x
△ σ_y
○ σ_r



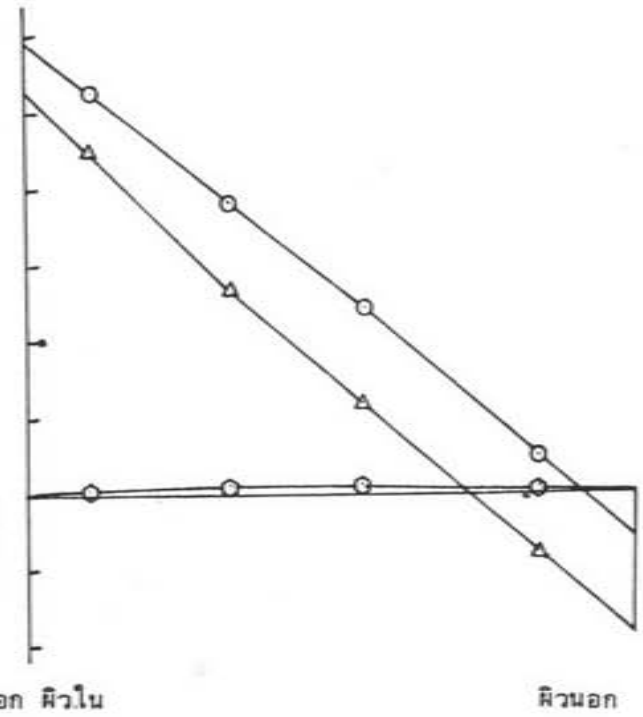
$\bar{\epsilon} = 134$

หน้าตัด 1



$\bar{\epsilon} = 86$

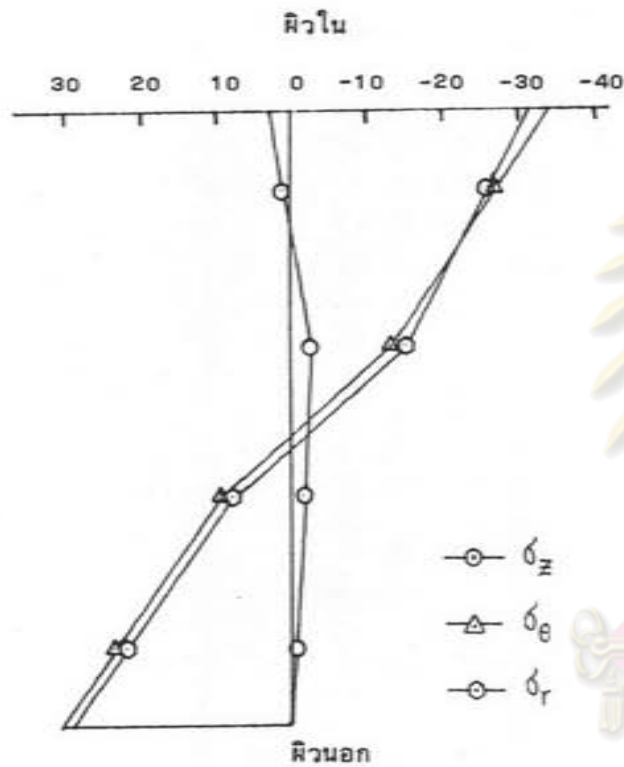
หน้าตัด 2



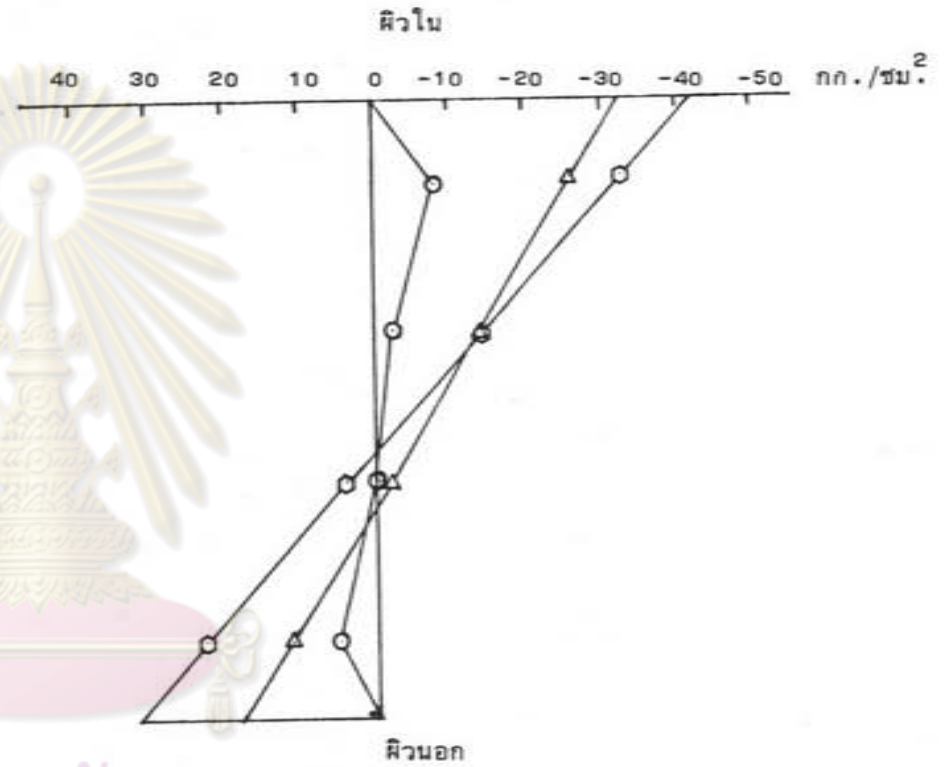
$\bar{\epsilon} = 34$

หน้าตัด 3

รูปที่ 4.7 การกระจายของหน่วยแรงที่หน้าตัด 1, 2, 3 บนผนัง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิและการอัดแรงภายใต้แรงดึงประสิทธิผลวิเคราะหโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



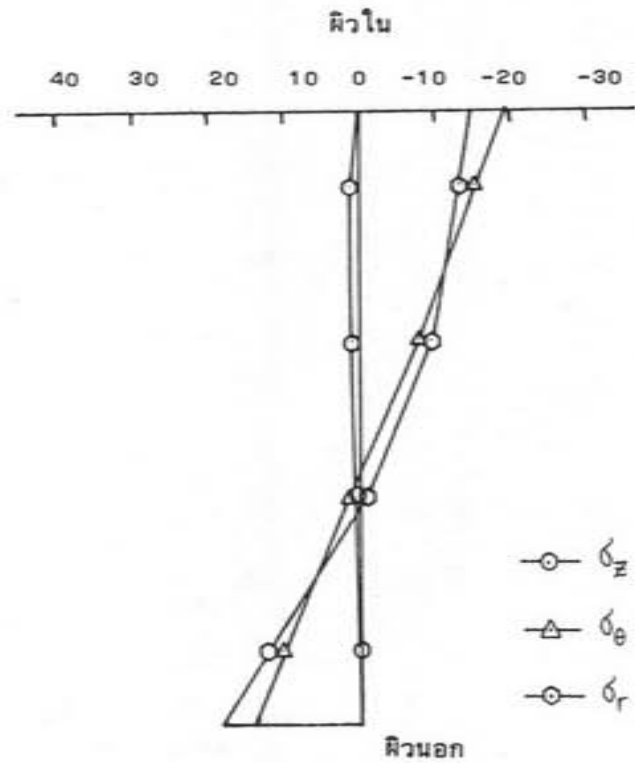
$r = 62.5$
หน้าคัต 4



$r = 2.5$
หน้าคัต 5

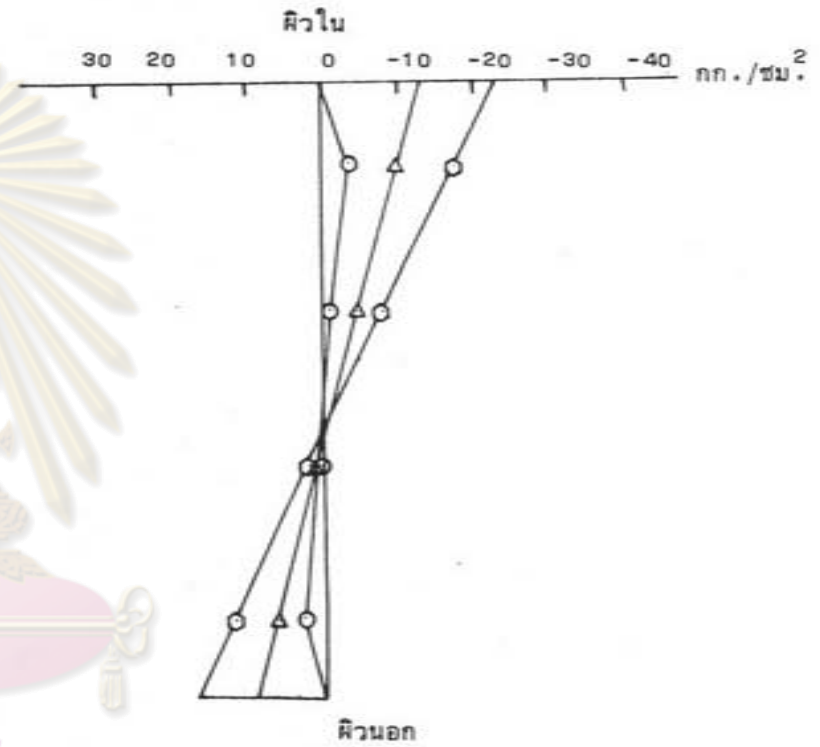
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.8 การกระจายของหน่วยแรงที่หน้าคัต 4, 5 บนพื้นถึง เนื่องจาก
การเพิ่มอุณหภูมิ วิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์



$r_i = 62.5$
หน้าตัด 4

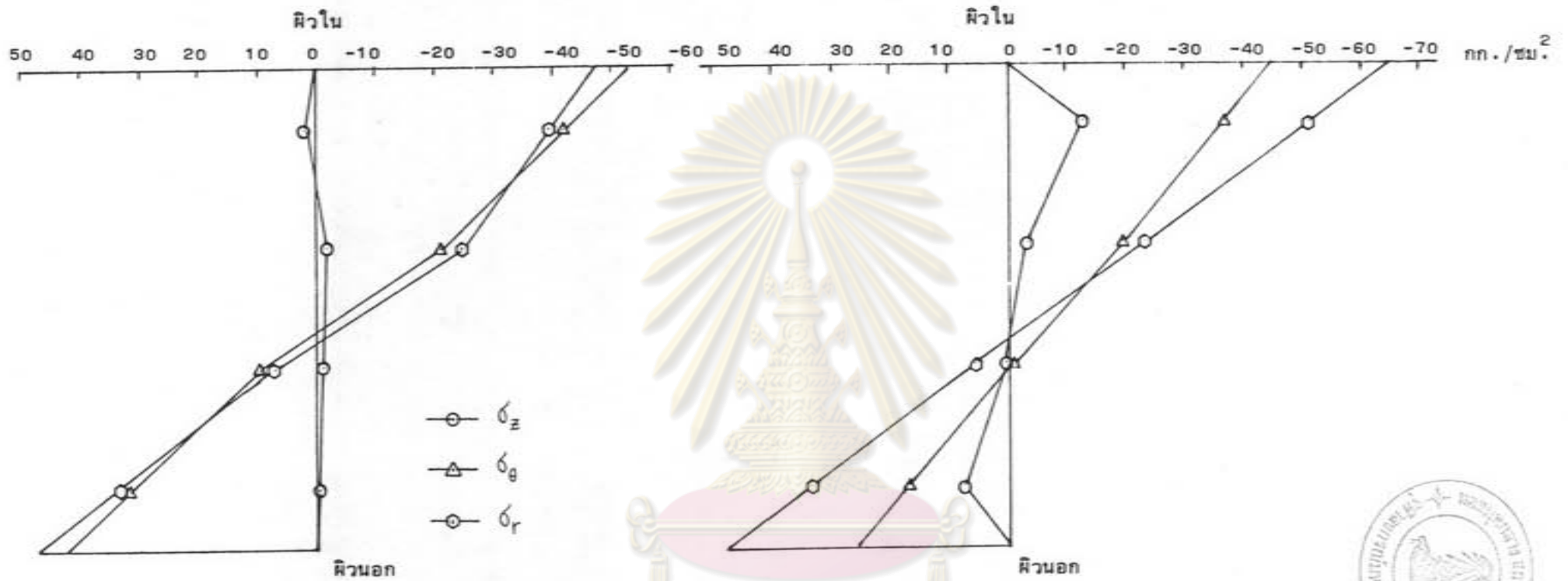
○ σ_z
△ σ_θ
□ σ_r



$r_i = 2.5$
หน้าตัด 5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.9 การกระจายของหน่วยแรงที่หน้าตัด 4, 5 บนพื้นตั้ง เนื่องจากการอัดแรง วิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



$r = 62.5$

หน้าตัด 4

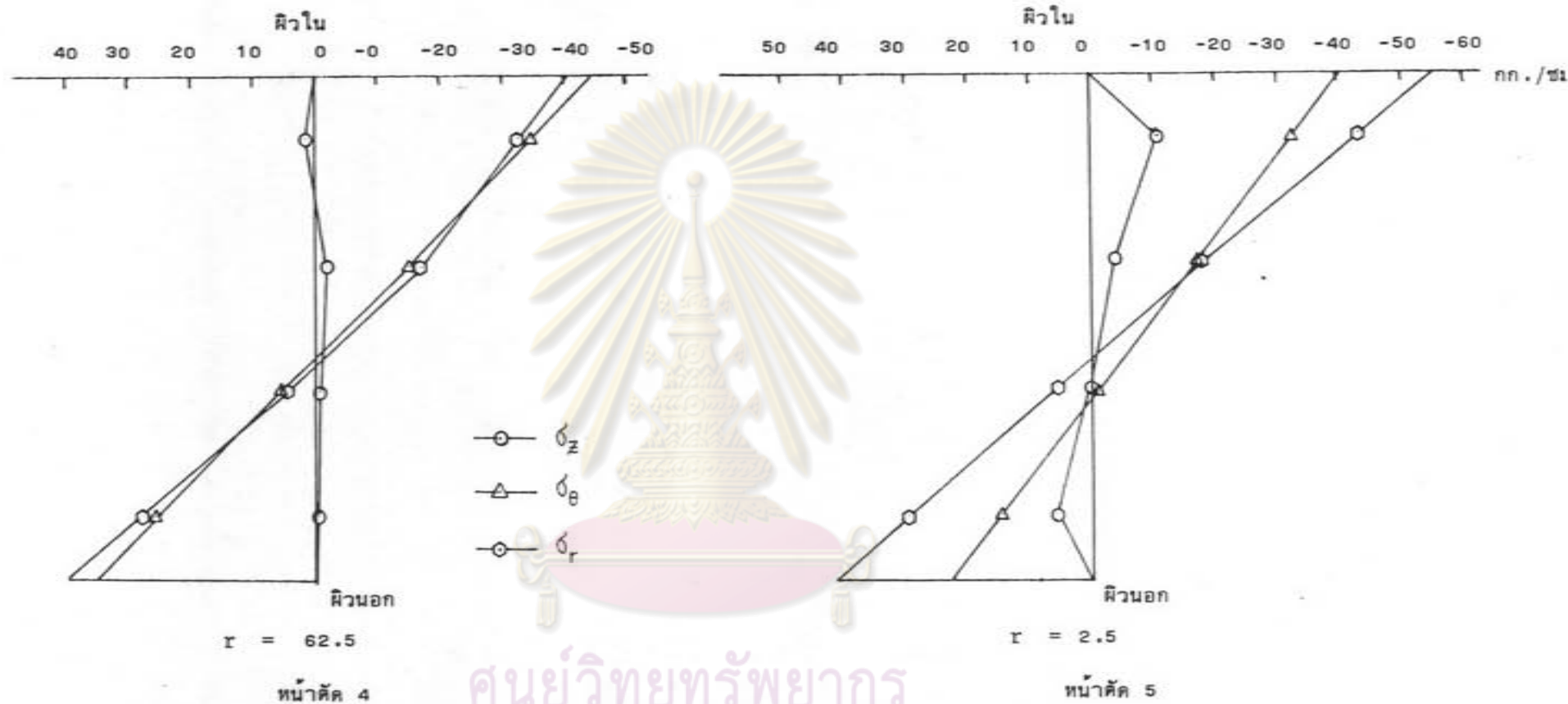
$r = 2.5$

หน้าตัด 5

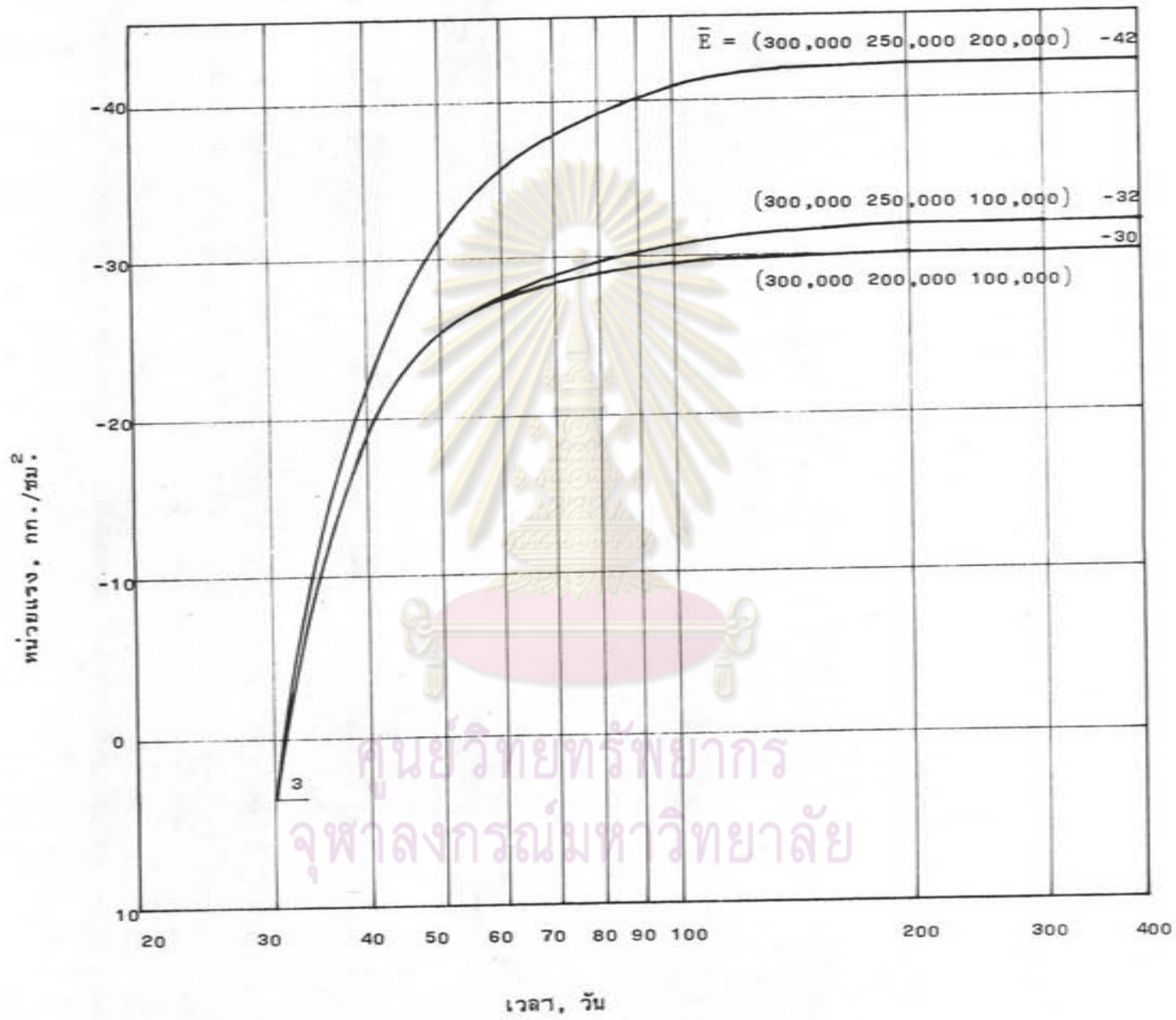
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.10 การกระจายของหน่วยแรงที่หน้าตัด 4.5 บนพื้นตั้ง เนื่องจากการ
เพิ่มอุณหภูมิและการอัดแรง วิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์

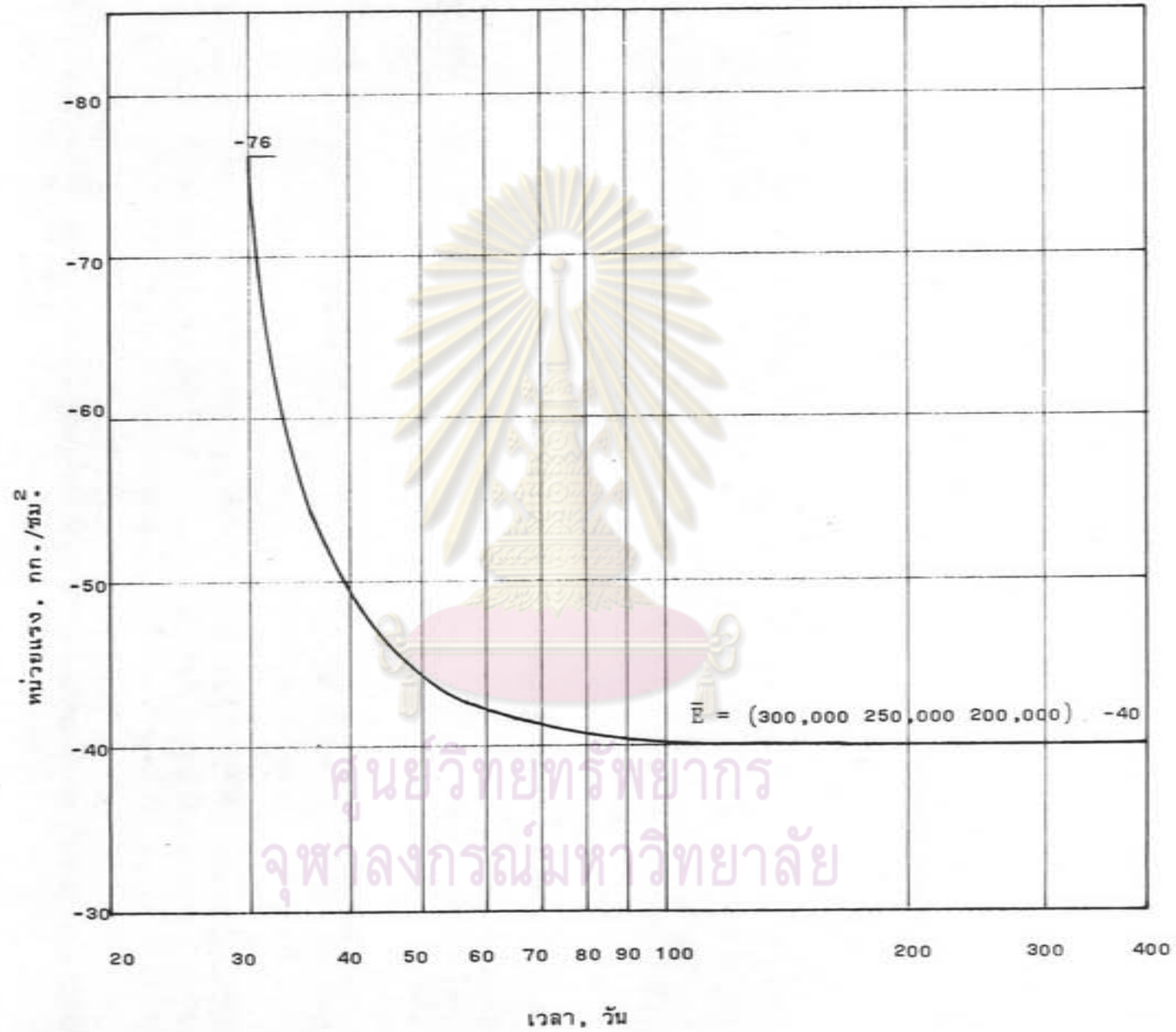




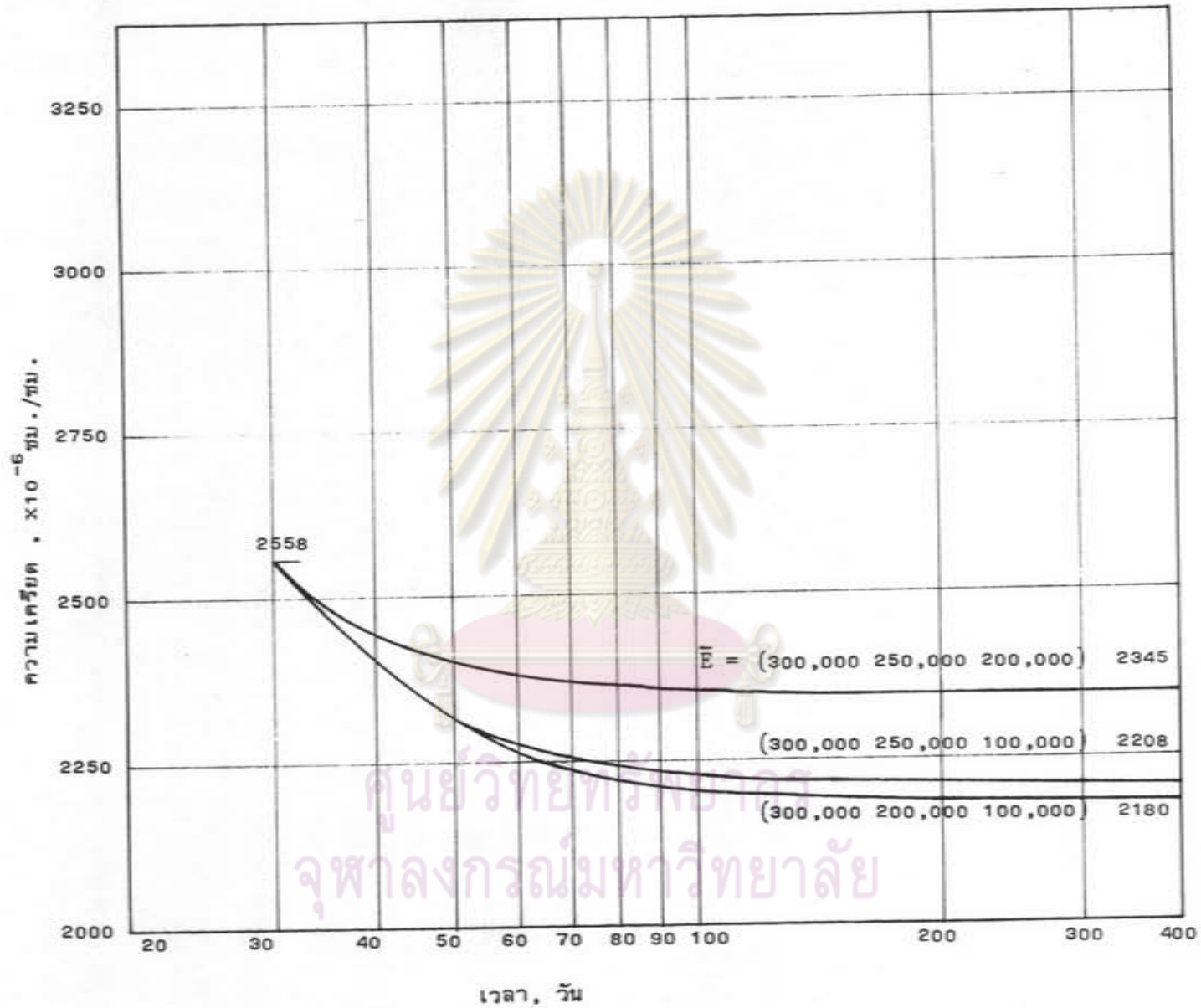
รูปที่ 4.11 การกระจายของหน่วยแรงที่หน้าตัด 4, 5 บนพื้นถัง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิและการอัดแรงภายใต้แรงดึงประลัษณิล วิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



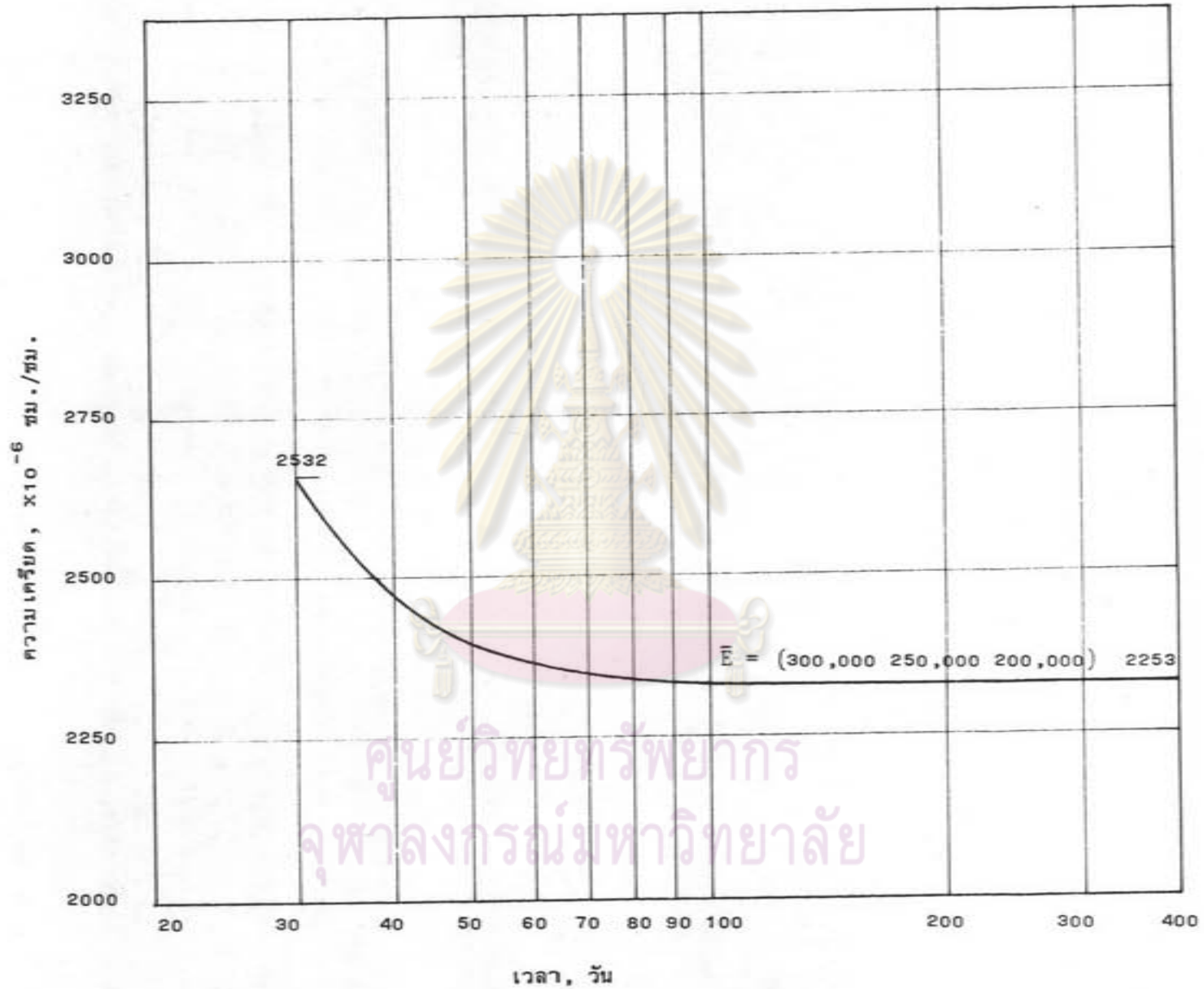
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงแนวเส้นรอบวงที่ความนอกของผนัง ($z = 80$ ซม.) กับเวลาจากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีวิสโคอีลาสติก



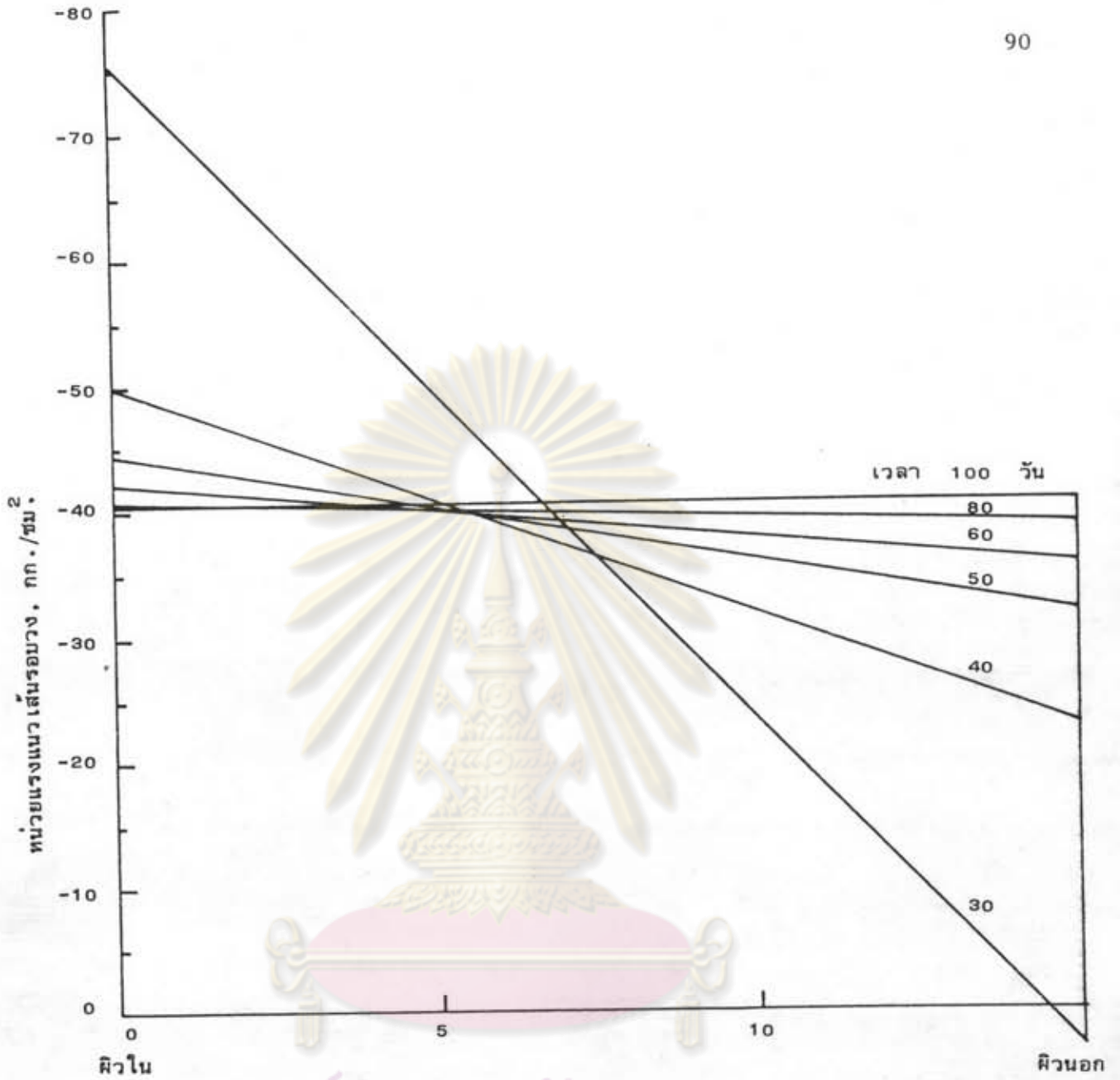
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงแนวเส้นรอบวงที่ผิวในของผนัง ($Z = 80$ ซม.) กับเวลาจากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีวิสโคอีลาสติก



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นคานวเส้นรอบวงที่ผิวหน้าของหมั่ง ($z = 80$ ซม.) กับเวลาจากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีวิสโคอีลาสติก



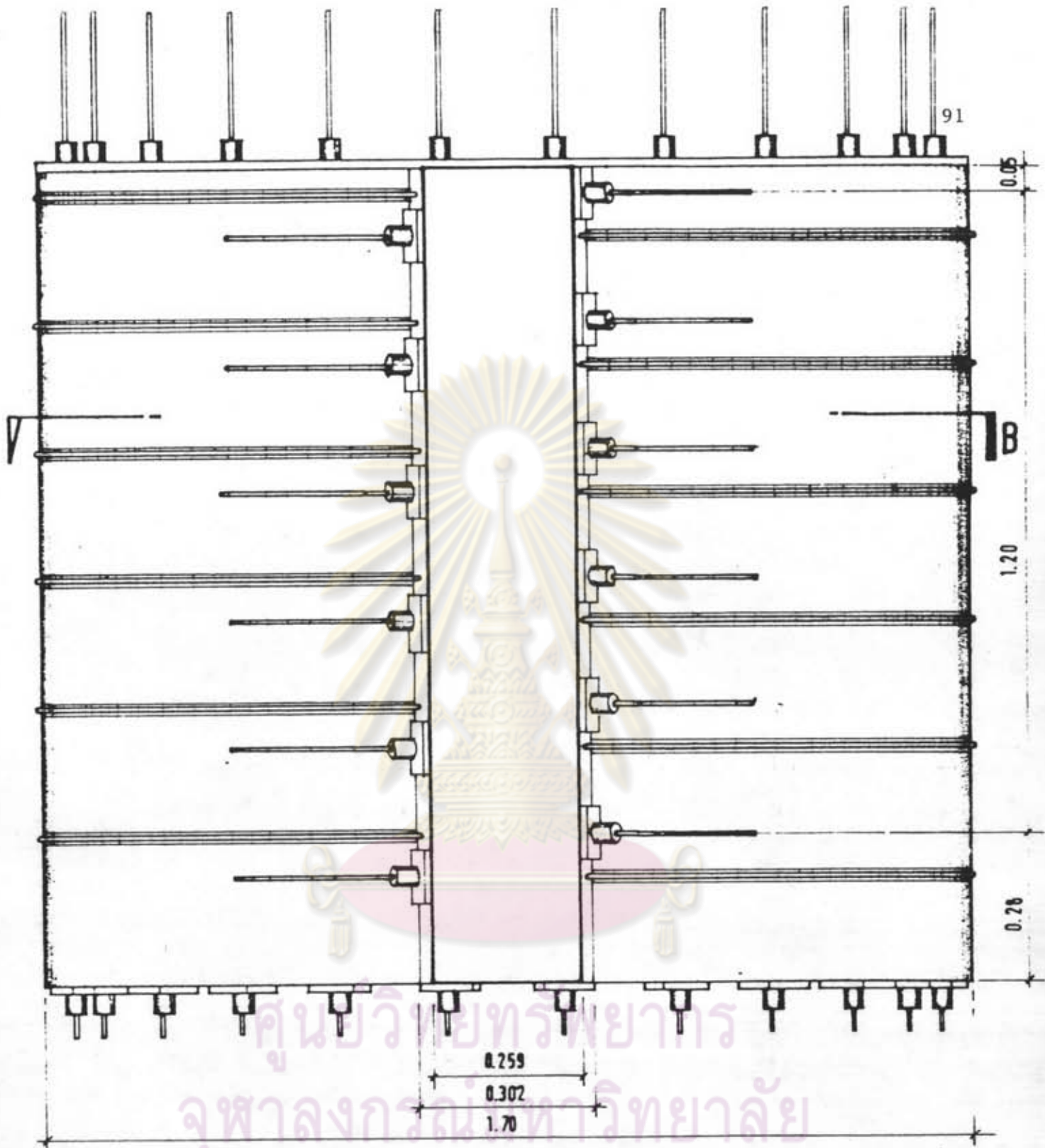
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเคียดแนวเส้นรอบวงที่ผิวในของหนัง ($\xi = 80$ ซม.) กับเวลาจากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีวิสโคอีลาสติก



ความหนาของผนังคอนกรีต, ซม.

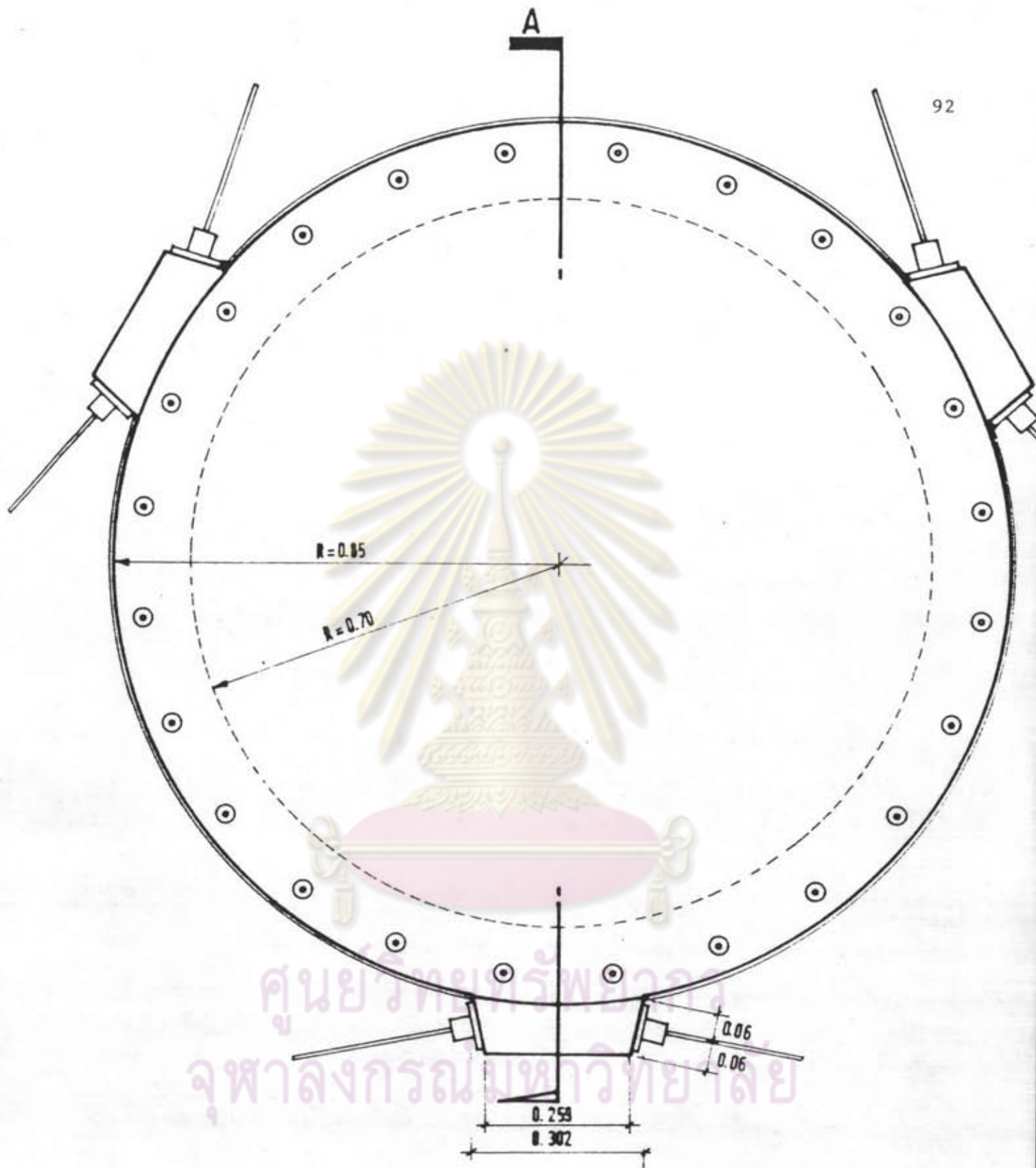
ศูนย์วิจัยทรัพยากร

รูปที่ 4.16 การกระจายของหน่วยแรงแนวเส้นรอบวงที่หน้าตัดผนัง (z = 80 ซม.) ที่เวลา 30 ถึง 100 วัน จากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีวิสโคอีลาสติก (E = 300,000 250,000 200,000)



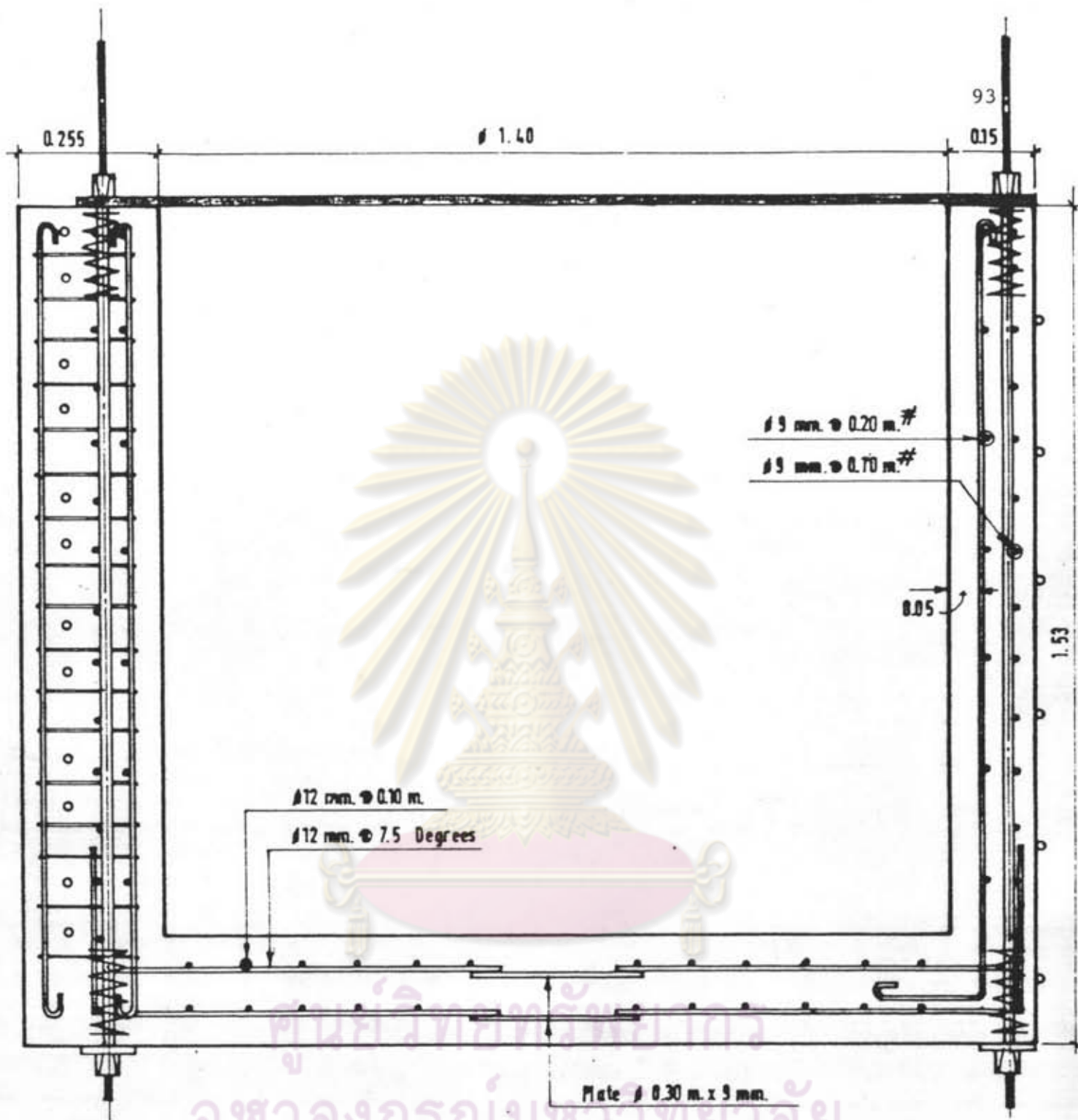
รูปด้าน 1:10

รูปที่ 4.17 แสดงรูปด้านของถังทดลอง



แปลน 1:10

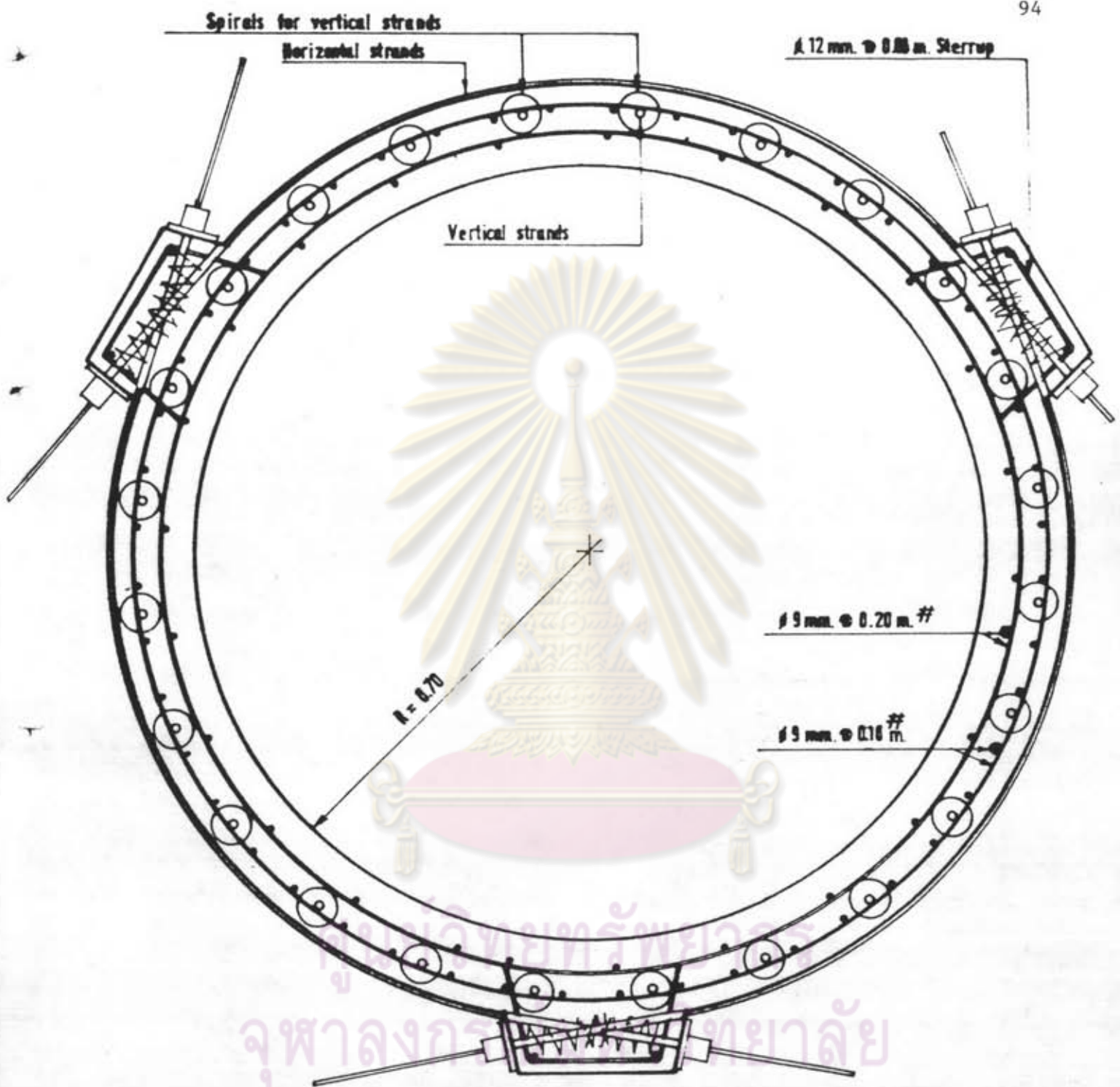
รูปที่ 4.18 แสดงรูปแปลนของถังทดลอง



ศูนย์วิจัยสหกรณ์การ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

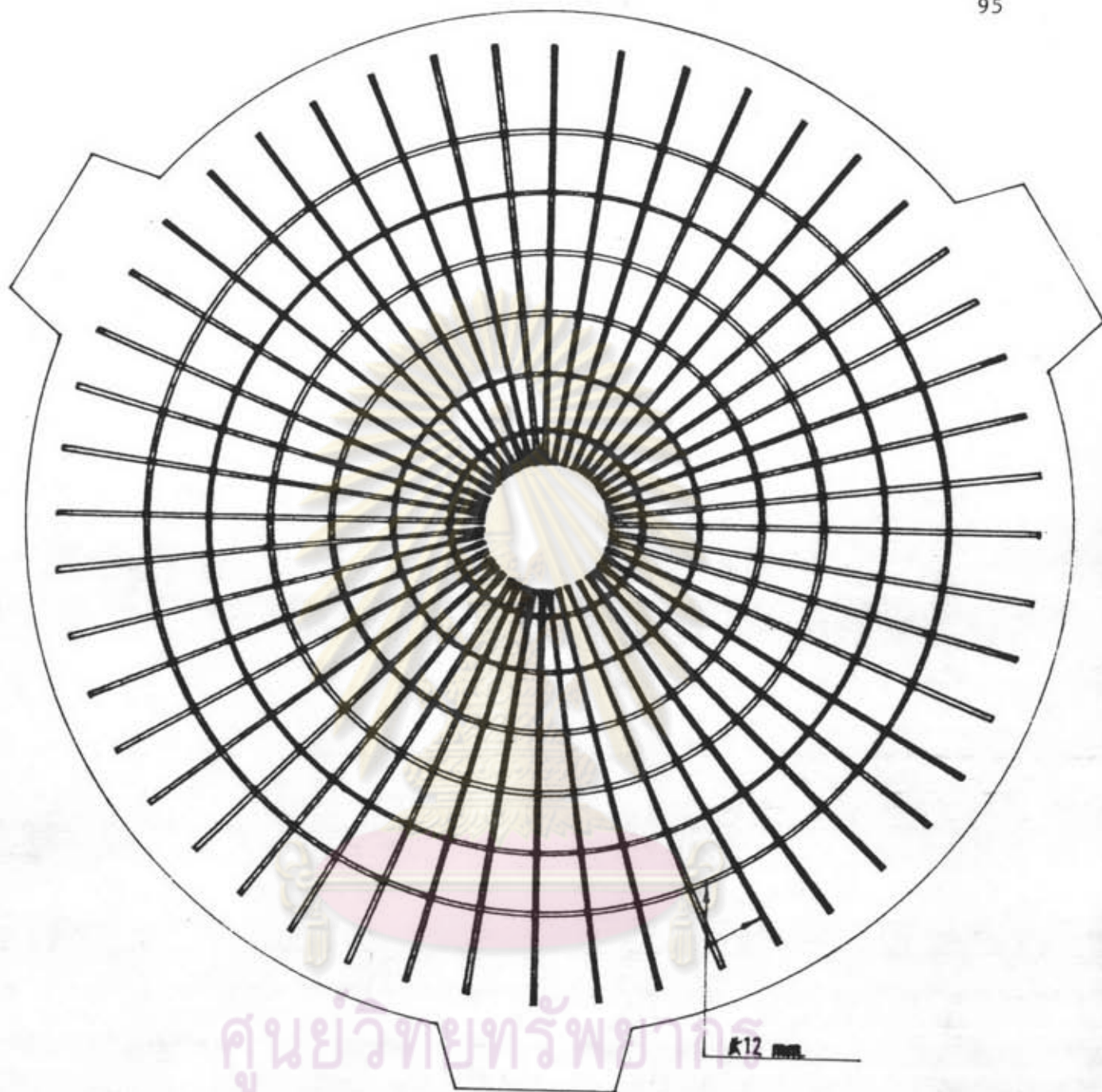
รูปตัด A 1:10

รูปที่ 4.19 แสดงรูปตัด A ของถังทดลอง



รูปตัด B 1.10

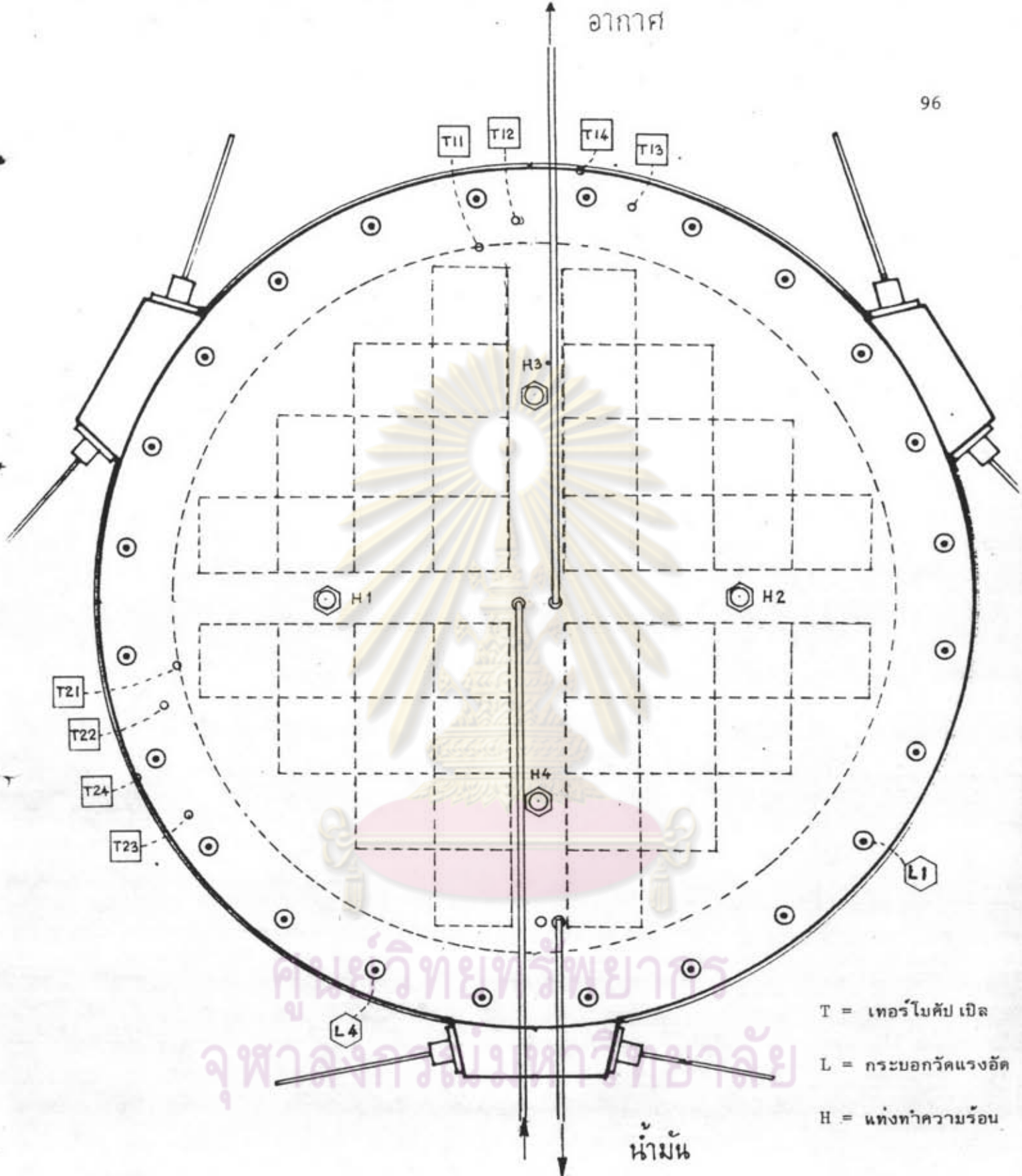
รูปที่ 4.20 แสดงรูปตัด B ของถังทดลอง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เหล็กเสริมพื้นชั้นล่าง 1:10

รูปที่ 4.21 แสดงเหล็กเสริมพื้นชั้นล่างของถังทดลอง

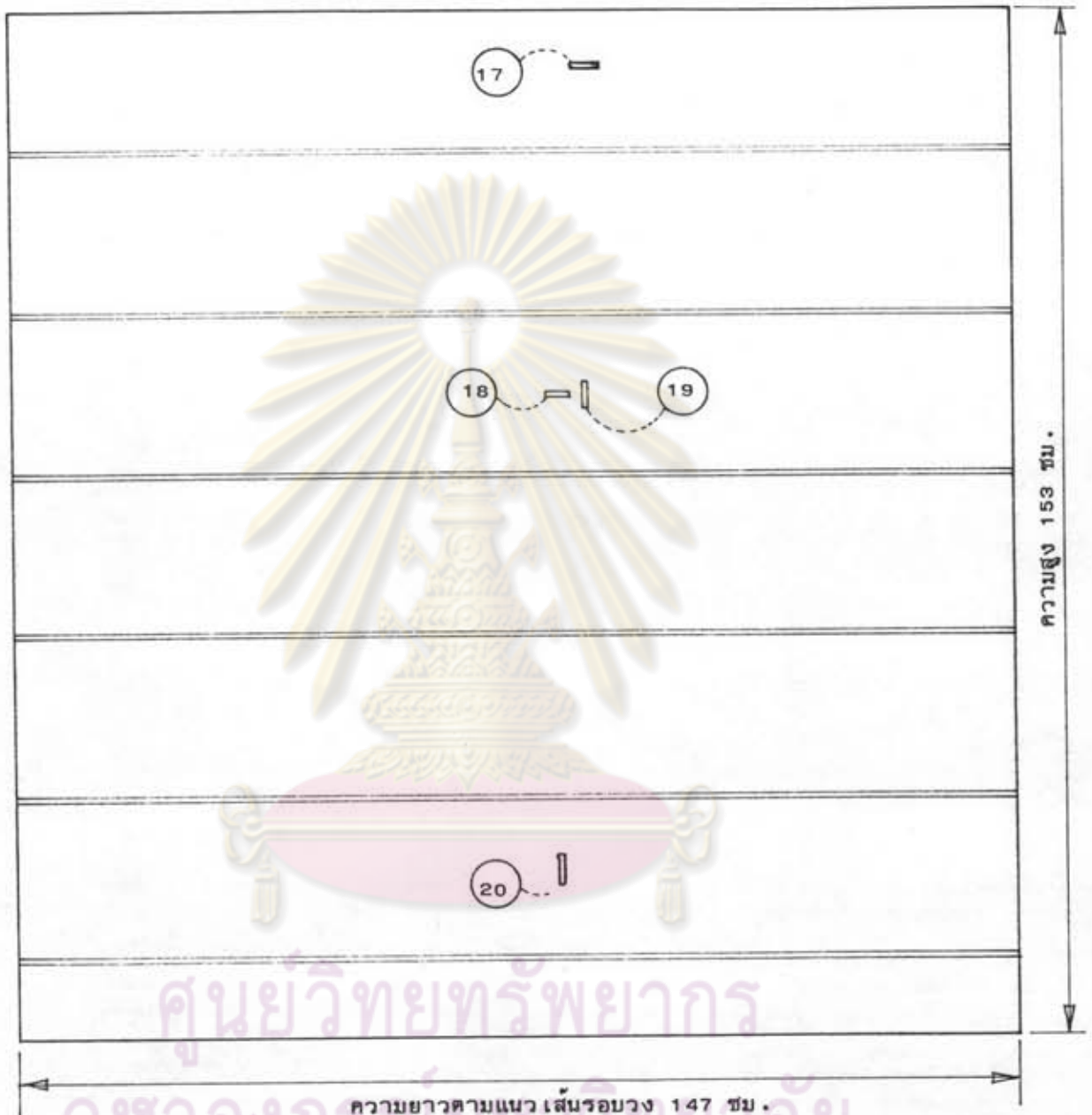


ศูนย์วิทยุโทรพยากรณ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- T = เทอร์โมคัปเปิล
- L = กระบอกวัดแรงอัด
- H = แท่งทำความร้อน

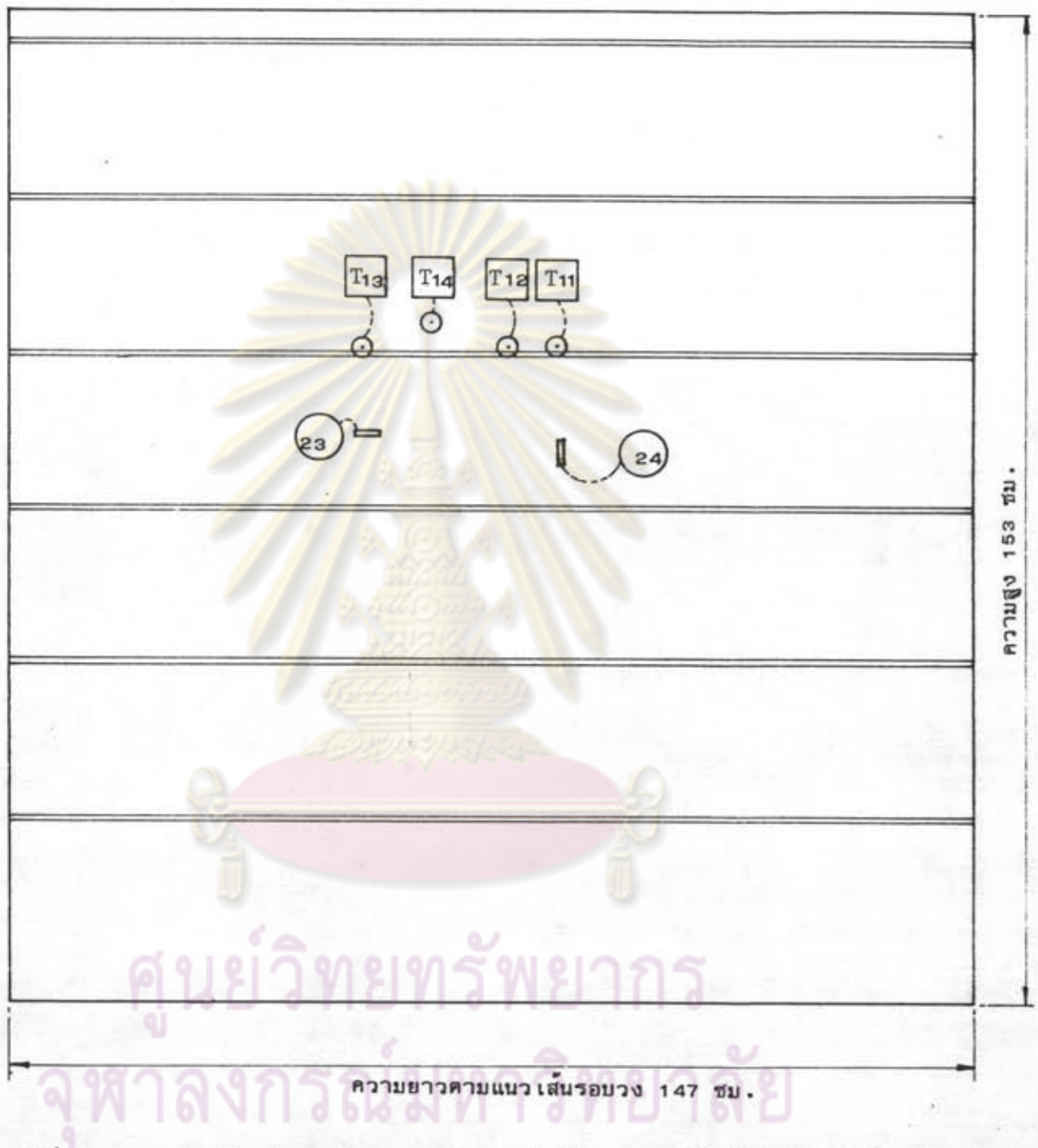
แปลน 1:10

รูปที่ 4.22 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ของถังทดลอง

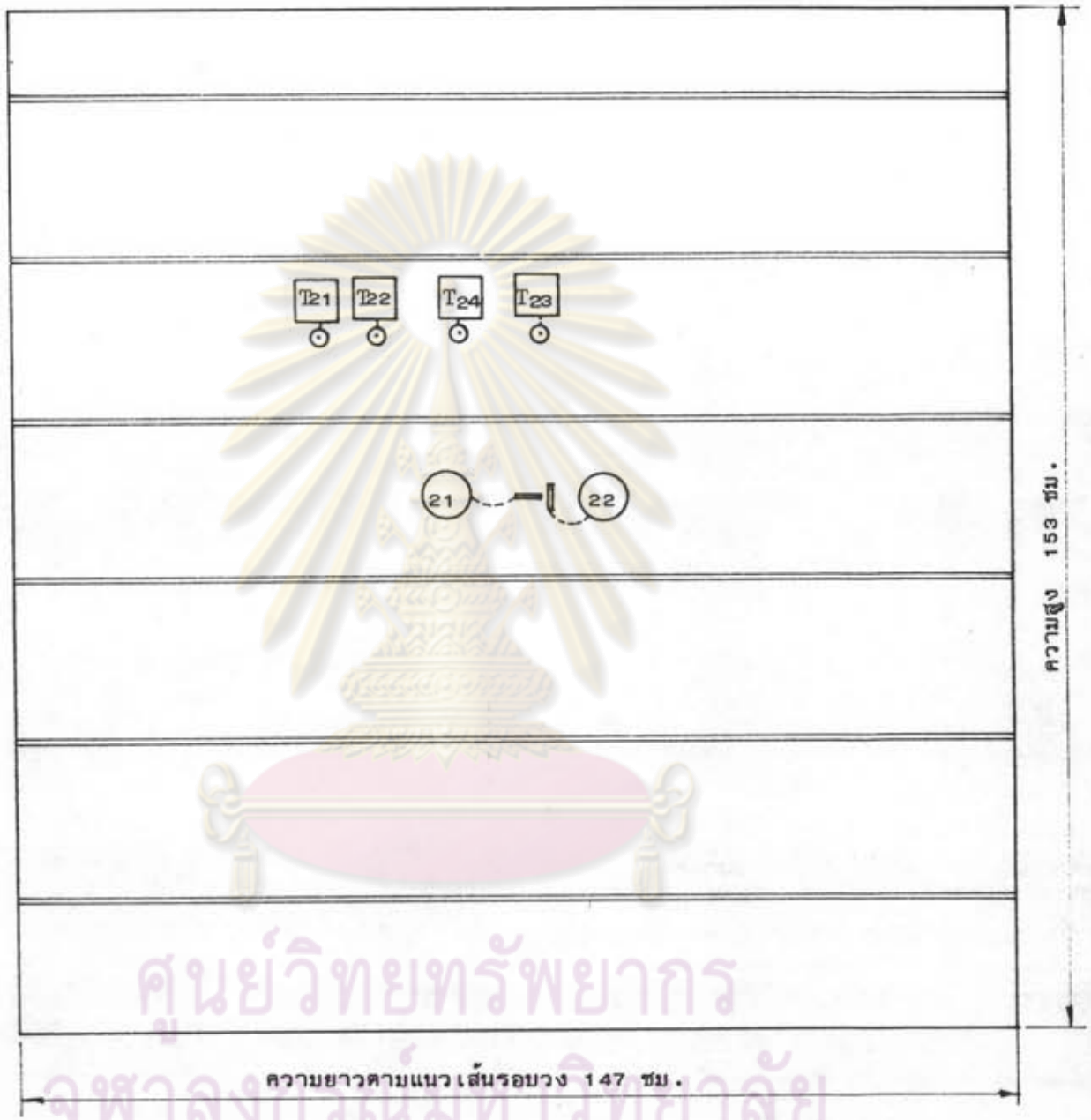


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

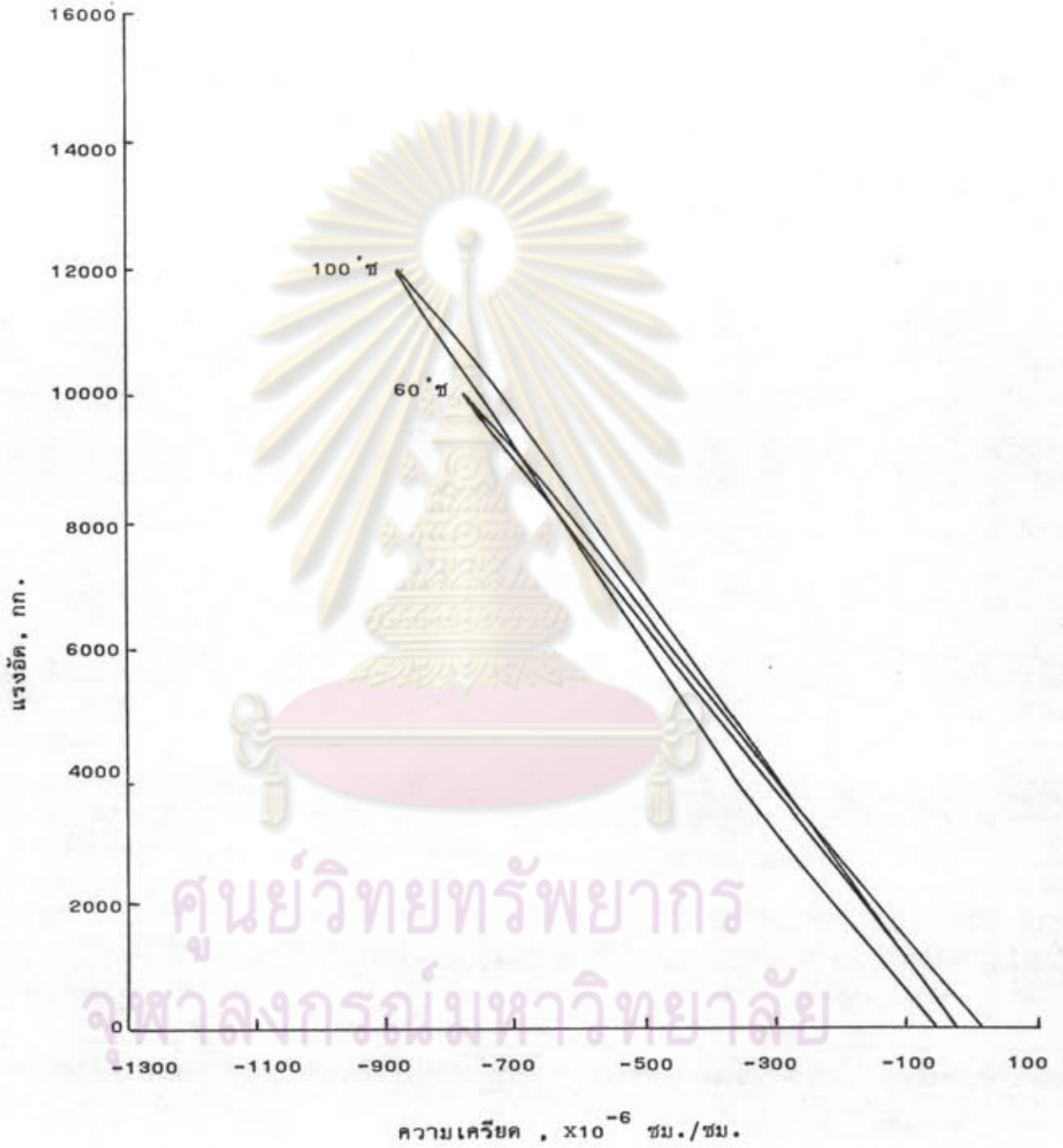
รูปที่ 4.23 แสดงตำแหน่ง เกจวัดความ เครียดแบบไฟฟ้าบนผนังด้านที่ 1



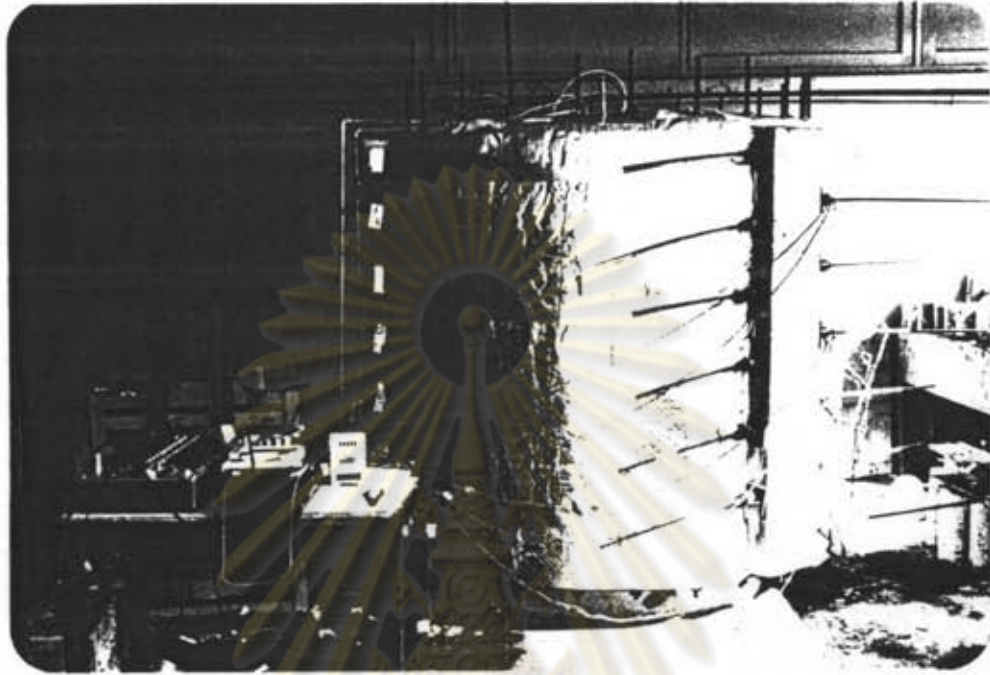
รูปที่ 4.24 แสดงตำแหน่ง เกจวัดความ เครียดแบบไฟฟ้า และ เทอร์โมคัปเปิลบนผนังด้านที่ 2



รูปที่ 4.25 แสดงตำแหน่ง เกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้าและ เทอร์โมคัปเปิลบนผนังด้านที่ 3

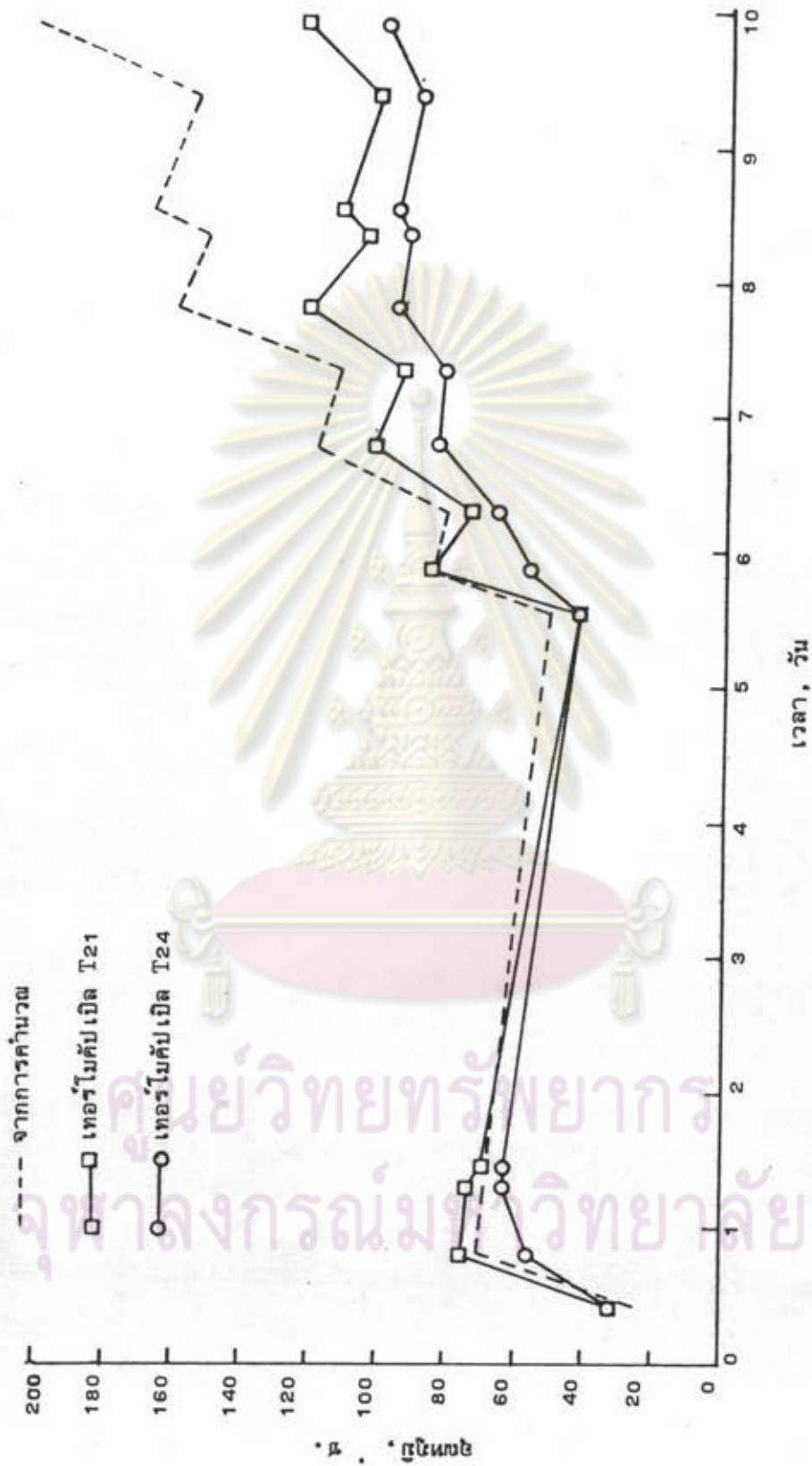


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับความเครียด
ของกระบอกวัดแรงอัด ที่ 60 kW และ 100 kW

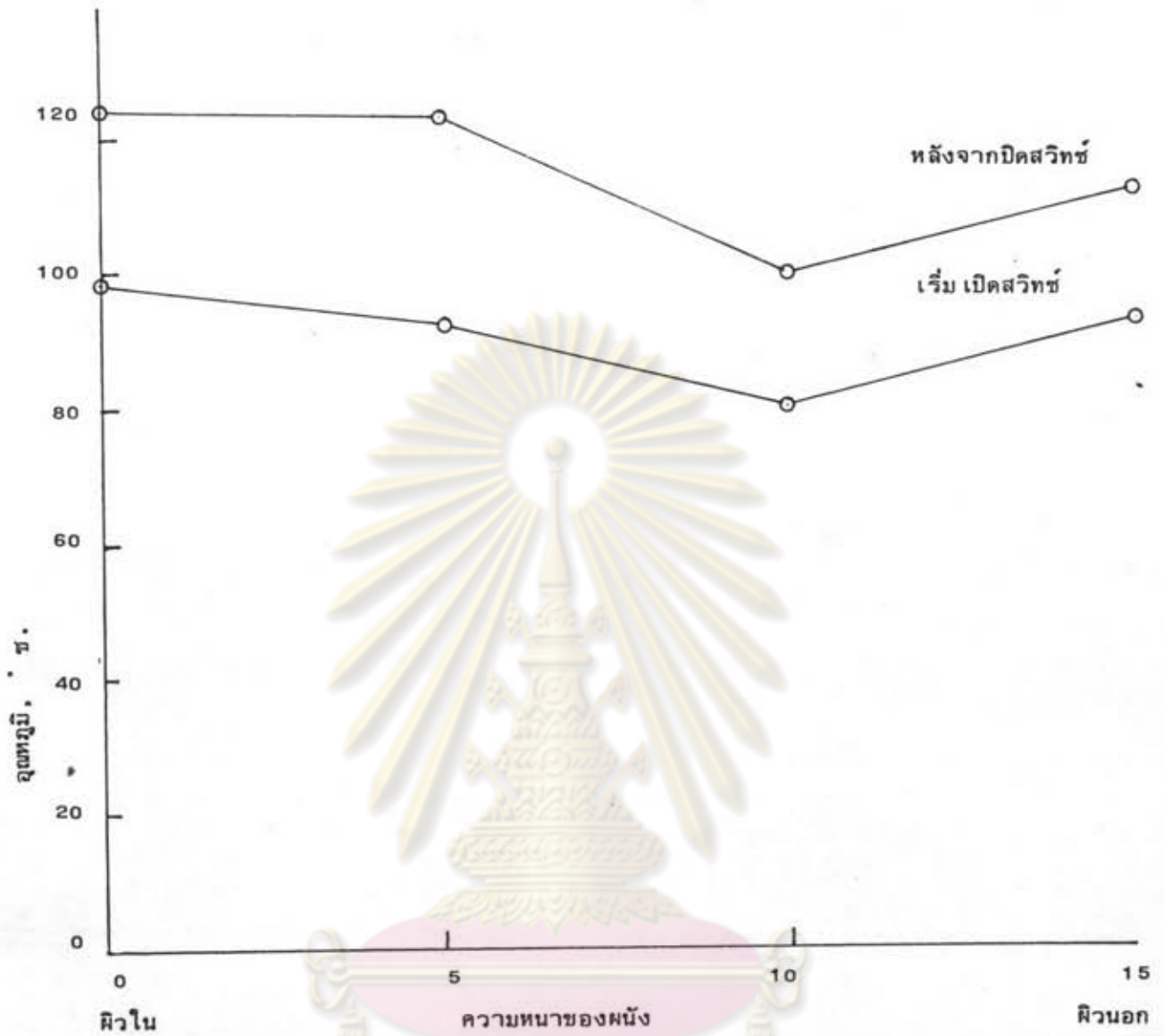


รูปที่ 4.27 ถังทดลองหลังจากติดตั้งอุปกรณ์และอัดแรง เสร็จ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

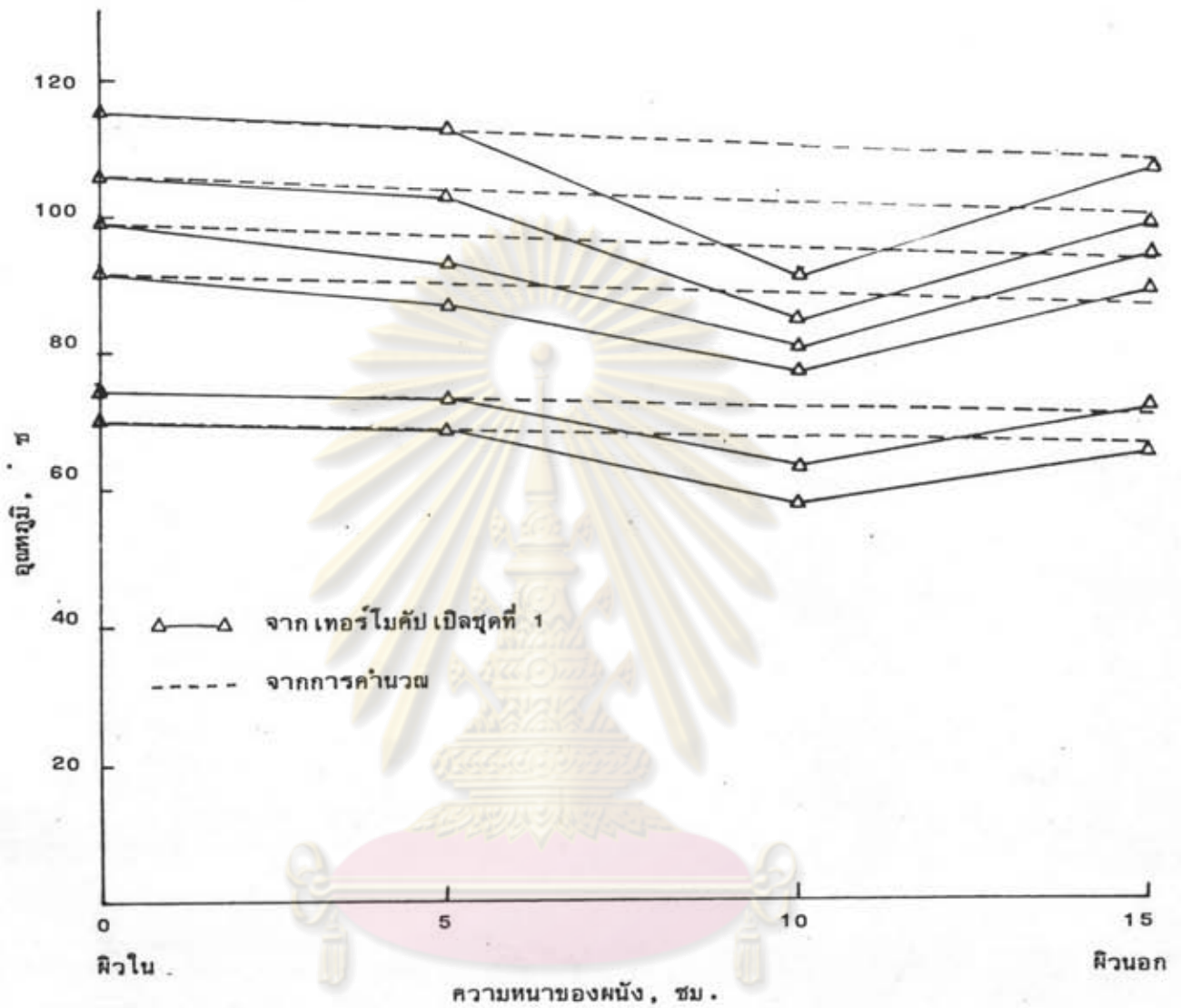


รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของถังทดลองกับ เวลา



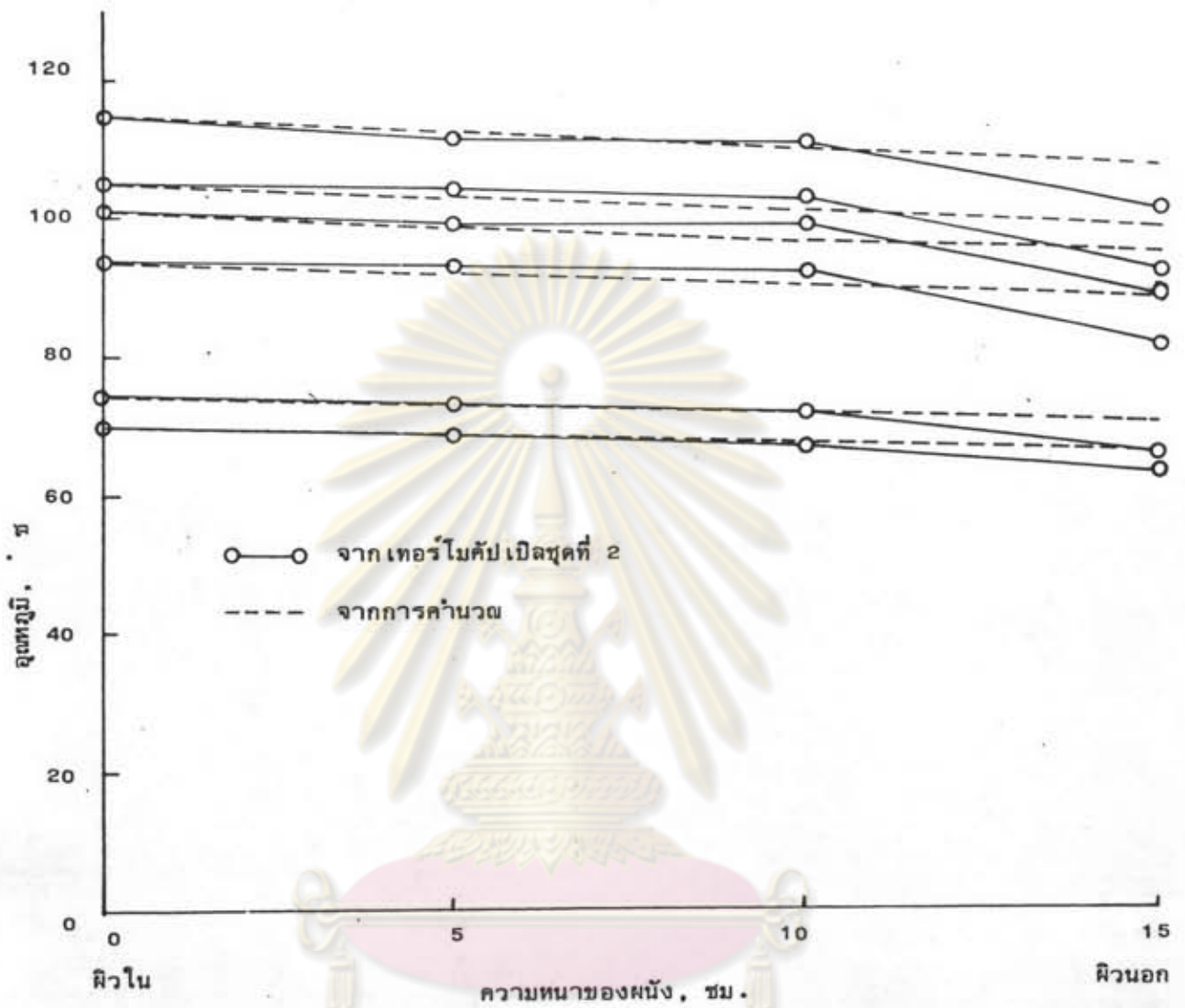
รูปที่ 5.2 การกระจายของอุณหภูมิตามความหนาของผนัง เมื่อเวลา เริ่ม เปิดและหลังจาก ปิดสวิทช์แห่งทำความร้อนของวันที่ 10 ของการทดลองเพิ่มอุณหภูมิ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.3 การกระจายของจุดหมึกตามความหนาของหมึกถึงทดลอง เมื่อเวลาเริ่ม เปิดสวิตซ์
 แท่งทำความร้อนตั้งแต่วันที่ 2 ถึงวันที่ 11 ของการทดลองเพิ่มจุดหมึก

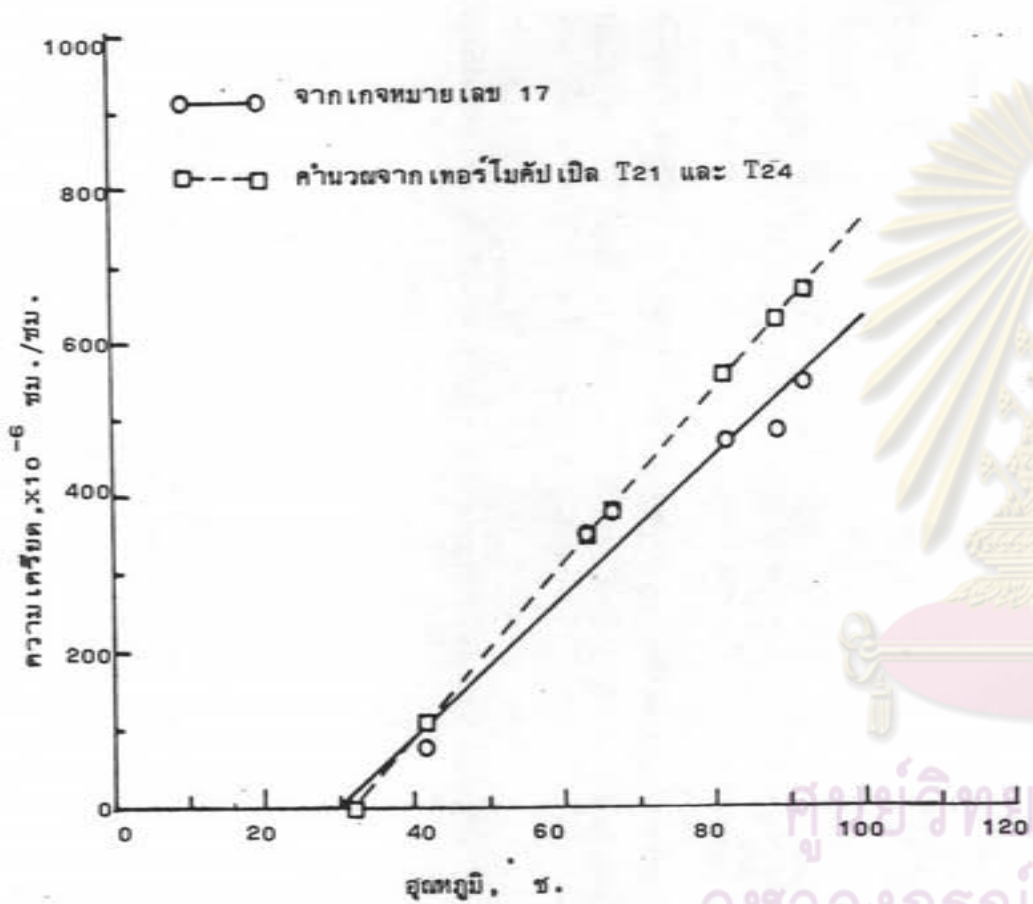
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



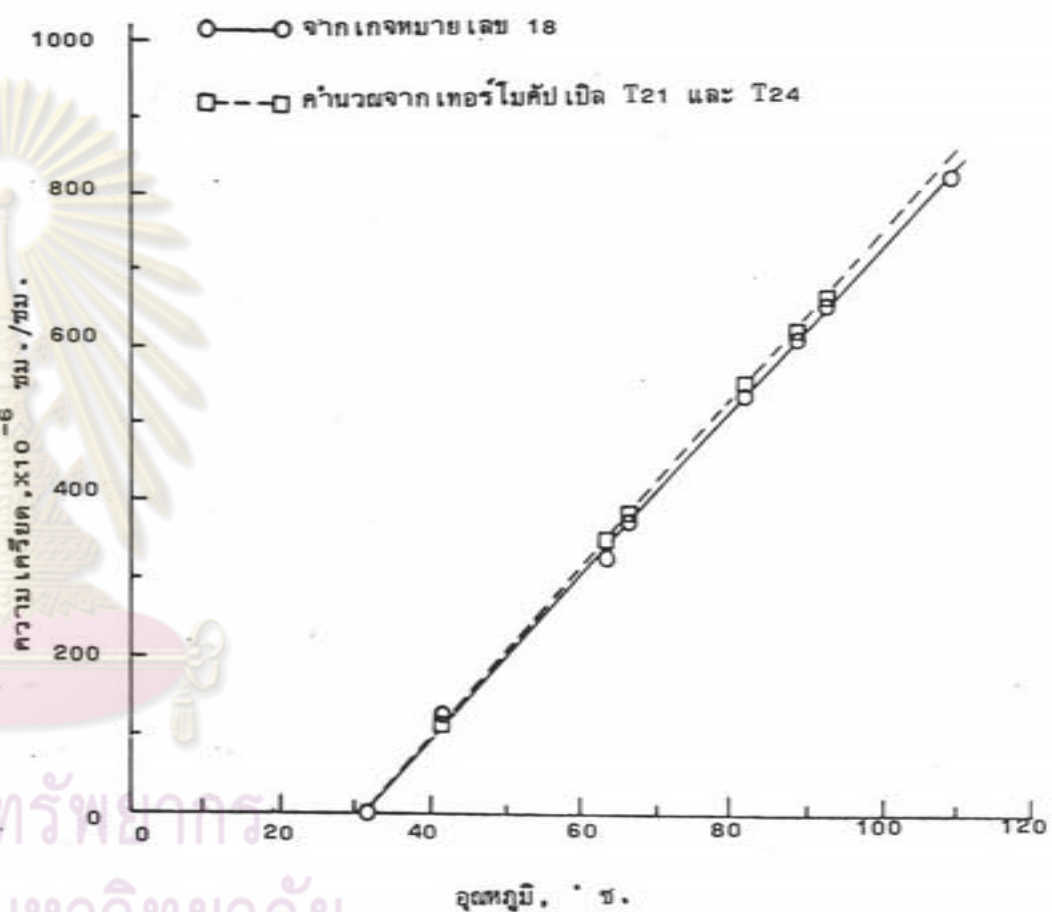
รูปที่ 5.4 การกระจายของอุณหภูมิตามความหนาของผนังดังทดลอง เมื่อเวลาเริ่ม เปิดสวิตซ์
 แห่งทำความร้อนตั้งแต่วันที่ 2 ถึงวันที่ 11 ของการทดลองเก็บอุณหภูมิ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร

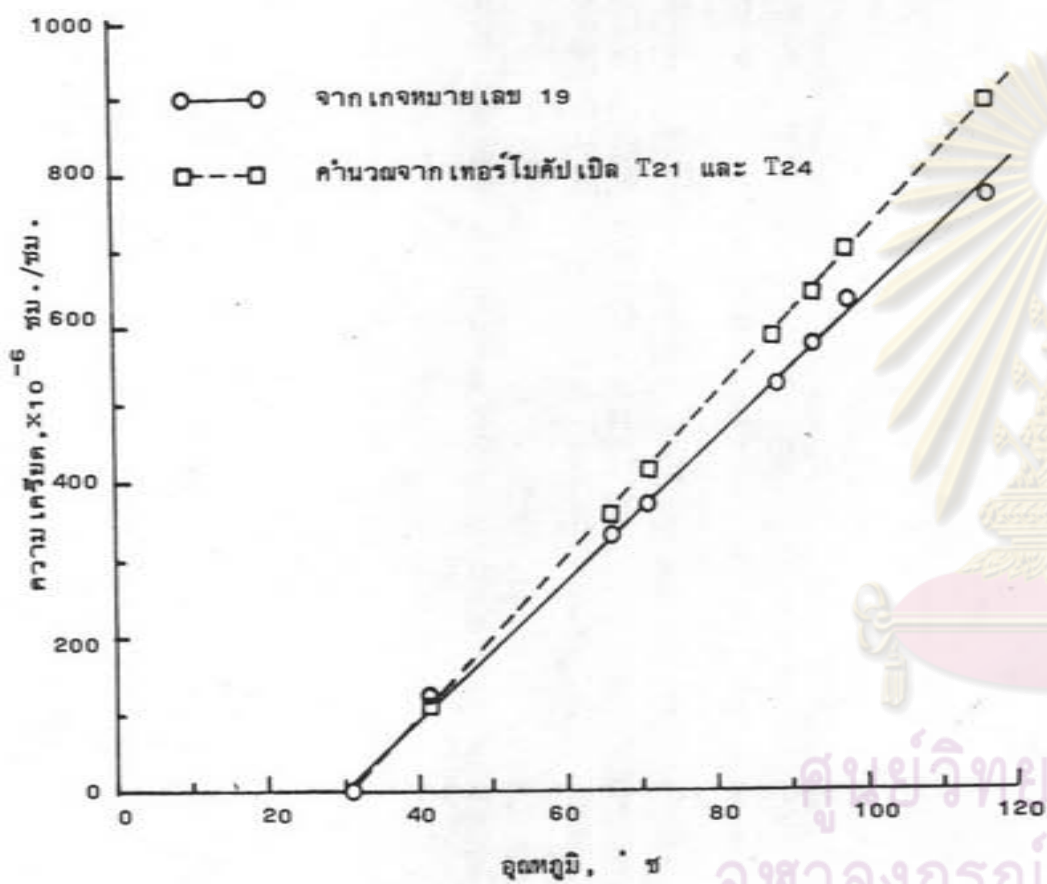
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



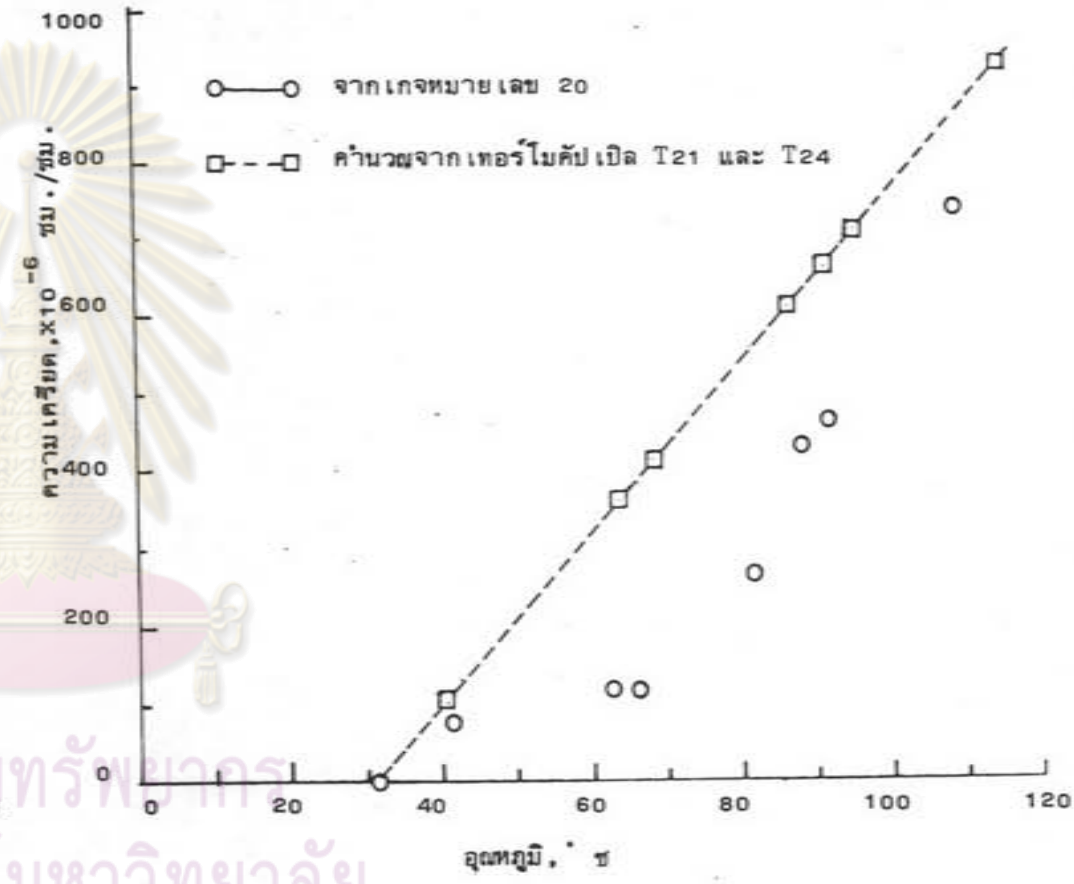
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเคียดในแนวเส้นรอบวง (เลขหมายเลข 17) กับมุมตกกระทบที่ผิวหน้าของผนังตั้ง (T24)



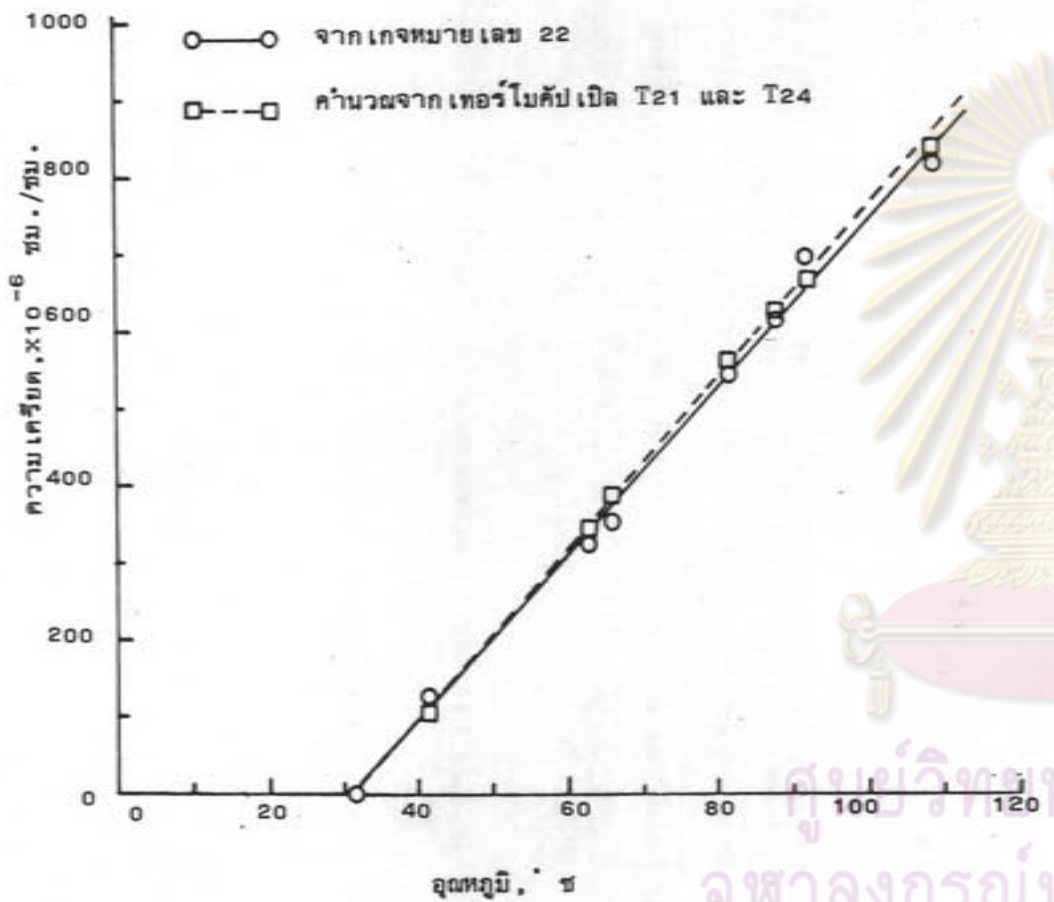
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเคียดในแนวเส้นรอบวง (เลขหมายเลข 18) กับมุมตกกระทบที่ผิวหน้าของผนังตั้ง (T24)



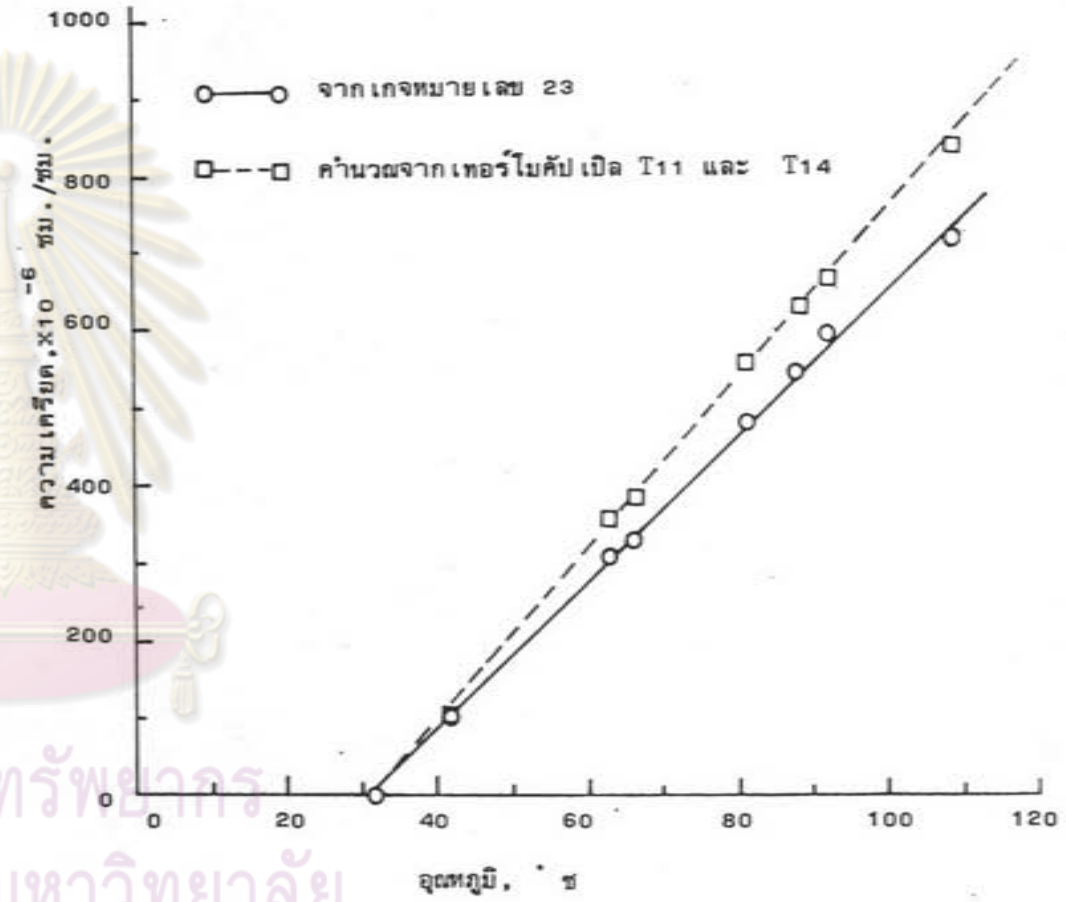
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเคียดในแนวตั้ง (เลขหมายเลข 19) กับมุมตกกระทบที่ผิวหน้าของผนังตั้ง (T24)



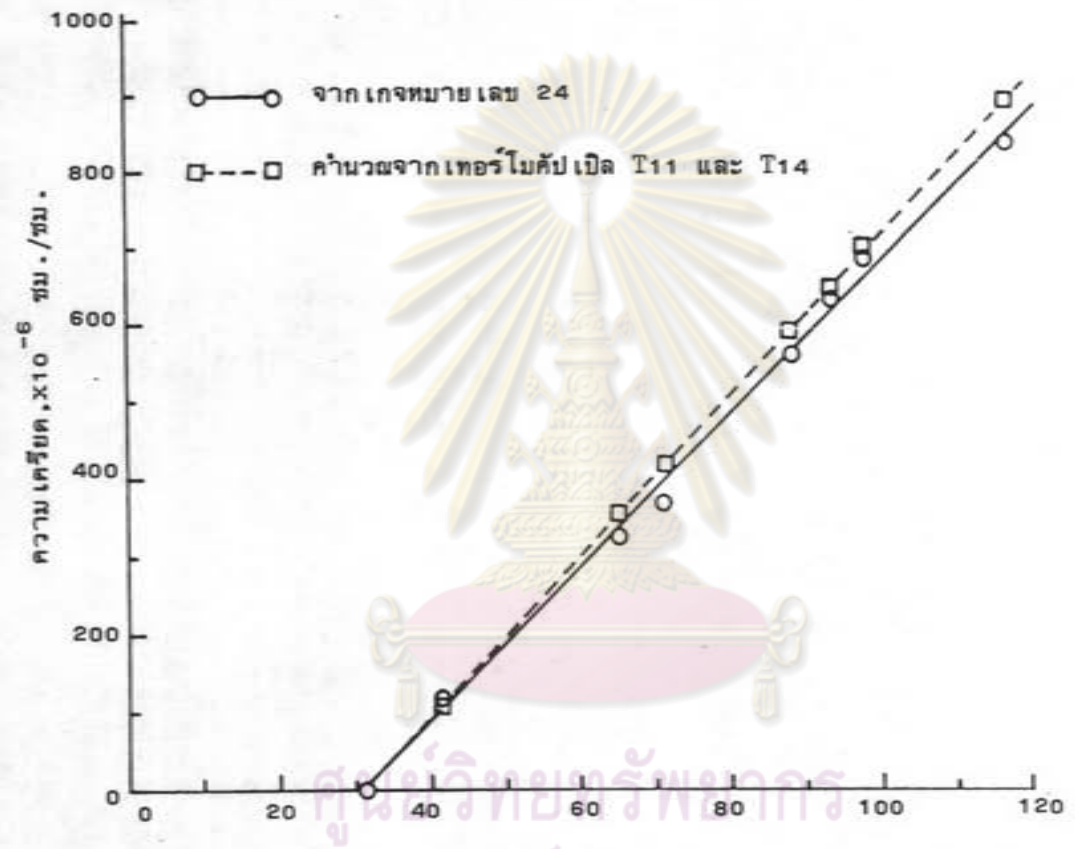
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเคียดในแนวตั้ง (เลขหมายเลข 20) กับมุมตกกระทบที่ผิวหน้าของผนังตั้ง (T24)



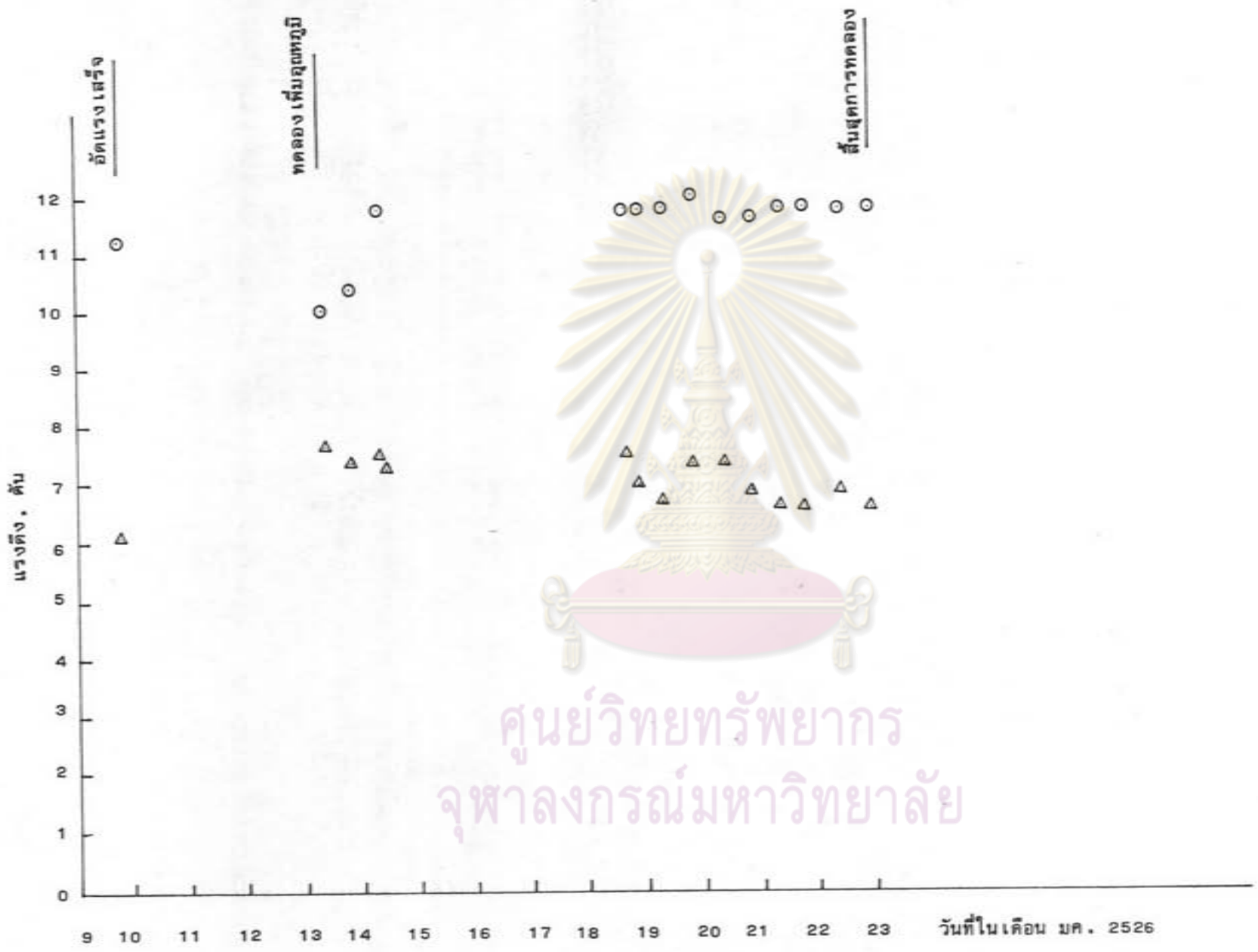
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเคียดในแนวตั้ง (เลขหมายเลข 22) กับจุดทงุมิที่ผิวนอกของผนังตั้ง (T24)



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเคียดในแนวเส้นรอบวง (เลขหมายเลข 23) กับจุดทงุมิที่ผิวนอกของผนังตั้ง (T14)



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวตั้ง (เกจหมายเลข 24) กับอุณหภูมิที่ผิวนอกของผนัง (T24)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงในเหล็ก เสริมอัดแรงกับ เวลาขณะทำการทดลอง เพิ่มอุณหภูมิ

ตัวอย่างการวิเคราะห์ เสาคอนกรีต เสริม เหล็ก โดยทฤษฎีวิสโคอีลาสติกเชิงเส้นตรงซึ่งอาศัยหลักการสมนัย

ตัวอย่างนี้ต้องการแสดงให้เห็นถึงวิธีการวิเคราะห์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมในระยะเวลานาน เนื่องจากการคืบของคอนกรีต การหาค่าคอบได้แสดงทั้งการหาค่าคอบแบบสูตรและการหาค่าคอบด้วยวิธีการเชิงตัวเลข แล้วเปรียบเทียบความถูกต้องของวิธีการหลังซึ่ง เป็นวิธีที่ใช้ในการวิจัยนี้ กำหนดให้ เสาคอนกรีต เสริม เหล็กรับแรงในแนวแกน 100 ตัน มีขนาดหน้าตัดกว้าง 61 ซม. หนา 30.5 ซม. พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม เท่ากับ 64.5 ซม.² โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก เท่ากับ 2,110,090 กก./ซม.² โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 30 วัน เท่ากับ 304,298 กก./ซม.² มีแรงกระทำที่อายุคอนกรีต เท่ากับ 30 วัน

ต้องการหา หน่วยแรงของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่เวลาใด ๆ ภายหลังจากที่มีแรงกระทำ การหาค่าคอบ

1. หน่วยแรงซึ่งหาได้โดยทฤษฎีอีลาสติก

$$\text{หน่วยแรงอัดของคอนกรีต } \sigma_c = \frac{E_c P}{A_c E_c + A_s E_s} \quad (ก.1)$$

$$\text{หน่วยแรงอัดของเหล็ก } \sigma_s = \frac{E_s P}{A_c E_c + A_s E_s} \quad (ก.2)$$

โดยที่

P = แรงในแนวแกนของเสา

A_s = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม

A_c = พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต

E_s = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม

E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 30 วัน

2. การหาค่าคอบแบบสูตรจากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีวิสโคอีลาสติกเชิงเส้นตรง

ในตัวอย่างนี้ใช้ครีพคอมโพลแอนซ์ของคอนกรีต เป็น

$$J(x, t' - \tau') = \frac{1}{E_1(x)} + \frac{T}{25} (t' - \tau') \quad (ก.3)$$

จากสมการ (ก.3) อาศัยการแปลงลาปลาซจะได้

$$s\bar{J}(x,s) = \frac{1}{E_1(x)} + \frac{T}{25} \cdot \frac{1}{s} \quad (ก.4)$$

สมมติให้จุดหมุนของคอนกรีตเท่ากับ 25 เซลเซียสทุกจุด จะได้สมการ (ก.4) เป็น

$$s\bar{J}(s) = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{s} \quad (ก.5)$$

จากค่าตอบอีลาสติกและอาศัยหลักการสมนัย จะได้คำตอบวิสโคอีลาสติกเป็น

$$s\bar{\sigma}_s(s) = \frac{E_s P}{\frac{A_c}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{s}\right)} + E_s A_s} \quad (ก.6)$$

จากสมการ (ก.6) และอาศัยการหาค่าการแปลงลาปลาซ จะได้

$$\sigma_s(t') = \frac{P}{A_s E_1} \left[E_1 - (E_1 - \alpha) \exp(-\alpha t') \right] \quad (ก.7)$$

โดยที่ $\alpha = \frac{A_s E_s E_1}{A_c E_1 + A_s E_s}$

เมื่อแทนค่าคงที่ต่าง ๆ ลงในสมการ (ก.7) จะได้คำตอบหน่วยแรงอัดในเหล็กเป็น

$$\sigma_s(t') = 1.55038 \times 10^3 - 1.24127 \times 10^3 \exp(-60671t') \quad (ก.8)$$

จากการสมมูลย์ จะได้ว่า

$$\sigma_c(t') = \frac{1}{A_c} [P - A_s \sigma_s(t')] \quad (ก.9)$$

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (ก.9) จะได้คำตอบหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเป็น

$$\sigma_c(t') = 44.5779 \exp(-60671t') \quad (ก.10)$$

สำหรับคำตอบหน่วยแรงอัดของเหล็กเสริมหรือคอนกรีตที่เวลาใด ๆ นับตั้งแต่เริ่มมีแรงกระทำหาได้

โดยแทนค่า t' ด้วย $f(t)$ ซึ่งในที่นี้

$$f(t) = 46.2 \times 10^{-6} \left[(t)^{0.025} - 30^{0.025} \right] \quad (ก.11)$$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $f(t)$ กับ t ได้แสดงไว้ในรูปที่ ก.1

๓. การหาค่าตอบด้วยวิธีการเชิงตัวเลข

จากสมการ (ก.5) ให้

$$s\bar{J}(s) = \frac{1}{E(s)} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{s} \quad (ก.12)$$

เขียนสมการ (ก.6) ใหม่เป็น



$$s\bar{\sigma}_s(s) = \frac{E_s P}{A\bar{E}(s) + E_s A_s} \quad (\text{ก.13})$$

ส่วนขวามือของสมการ (ก.13) ที่มี $\bar{E}(s)$ เป็นตัวแปรเพียงตัวเดียว เราสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $s\bar{\sigma}_s(s)$ กับ $\bar{E}(s)$ เป็นเส้นโค้งเส้นหนึ่งได้ ใช้ฟังก์ชันโพลีโนเมียลสำหรับประมาณค่าของ $s\bar{\sigma}_s(s)$ ได้ในช่วงของค่า $E(s)$ ที่ไม่กว้างมากนัก ดังนี้

$$s\bar{\sigma}_s(s) = a_0 + a_1 \bar{E}(s) + a_2 \bar{E}^2(s) \quad (\text{ก.14})$$

โดยที่ 1, $\bar{E}(s)$ และ $\bar{E}^2(s)$ เป็นฟังก์ชันแห่งการประมาณค่าภายในช่วง และ a_0 , a_1 และ a_2 เป็นสัมประสิทธิ์ซึ่งไม่รู้ค่า

เลือก $s\bar{\sigma}_s(s)$ และ $\bar{E}(s)$ ที่สมนัยกัน 3 คู่ จากสมการ (ก.13) แล้วแทนค่าลงในสมการ (ก.14) 3 ครั้งจะได้สมการที่มี a_0 , a_1 และ a_2 เป็นตัวไม่รู้ค่า เมื่อแก้สมการเหล่านี้จะได้ค่า a_0 , a_1 และ a_2 สมการ (ก.14) นี้เมื่อใช้การหาค่าการแปลงลาปลาซของฟังก์ชัน ซึ่งมี $\bar{E}(s)$ ตามสมการ (ก.12) จะได้ค่าตอบเป็น

$$\sigma_s(t') = a_0 + a_1 E_1 \exp(-E_1 t') + a_2 E_1^2 (1 - E_1 t') \exp(-E_1 t') \quad (\text{ก.15})$$

สมการ (ก.15) นี้ ถือเป็นค่าตอบโดยประมาณของ $\sigma_s(t')$ ความถูกต้องของการประมาณขึ้นกับการเลือกเซตของ $\bar{E}(s)$ เมื่อพิจารณาสมการ (ก.13) โดยที่ $s = \infty$ ซึ่งทำให้ $\bar{E}(s) = E_1$ จะได้ว่า $s\bar{\sigma}_s(s)$ มีค่าเท่ากับ σ_s ที่เวลาเริ่มมีแรงกระทำ ถ้า $s = 0$ จะเป็นผลให้ $\bar{E}(s) = 0$ ซึ่งเหมือนกับว่าคอนกรีตมีการคืบมากจนกระทั่งหน่วยแรงอัดในคอนกรีตกลายเป็นศูนย์ การที่จะเป็นเช่นนี้ได้ต้องใช้เวลาดังนั้น แต่สำหรับในทางปฏิบัตินั้นอายุใช้งานของโครงสร้างนี้เพียง 20 ถึง 30 ปี ซึ่งยังมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นอยู่ขนาดหนึ่ง ดังนั้นเซตของ $\bar{E}(s)$ ที่ใช้จะอยู่ในช่วงตั้งแต่ E_1 ถึงโมดูลัสยืดหยุ่นประสิทธิ์ผล เช่นที่จะแสดงในตัวอย่างนี้ต่อไป เพื่อให้เห็นความละเอียดที่ได้เมื่อเลือกเซตของ $\bar{E}(s)$ ต่างๆ กัน ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} 1. \bar{E} &= (E_1, 1/E_1 + 3.9 \times 10^{-8} T, E_1 / (1 + 2.2)) \\ &= (304298, 234344, 95093) \end{aligned}$$

โดยที่สัมประสิทธิ์ของการคืบเท่ากับ 2.2

$$\begin{aligned} 2. \bar{E} &= (E_1, E_1/2, E_1(1 + 2.35)) \\ &= (304298, 152149, 90825) \end{aligned}$$

โดยที่สัมประสิทธิ์ของการคืบเท่ากับ 2.35

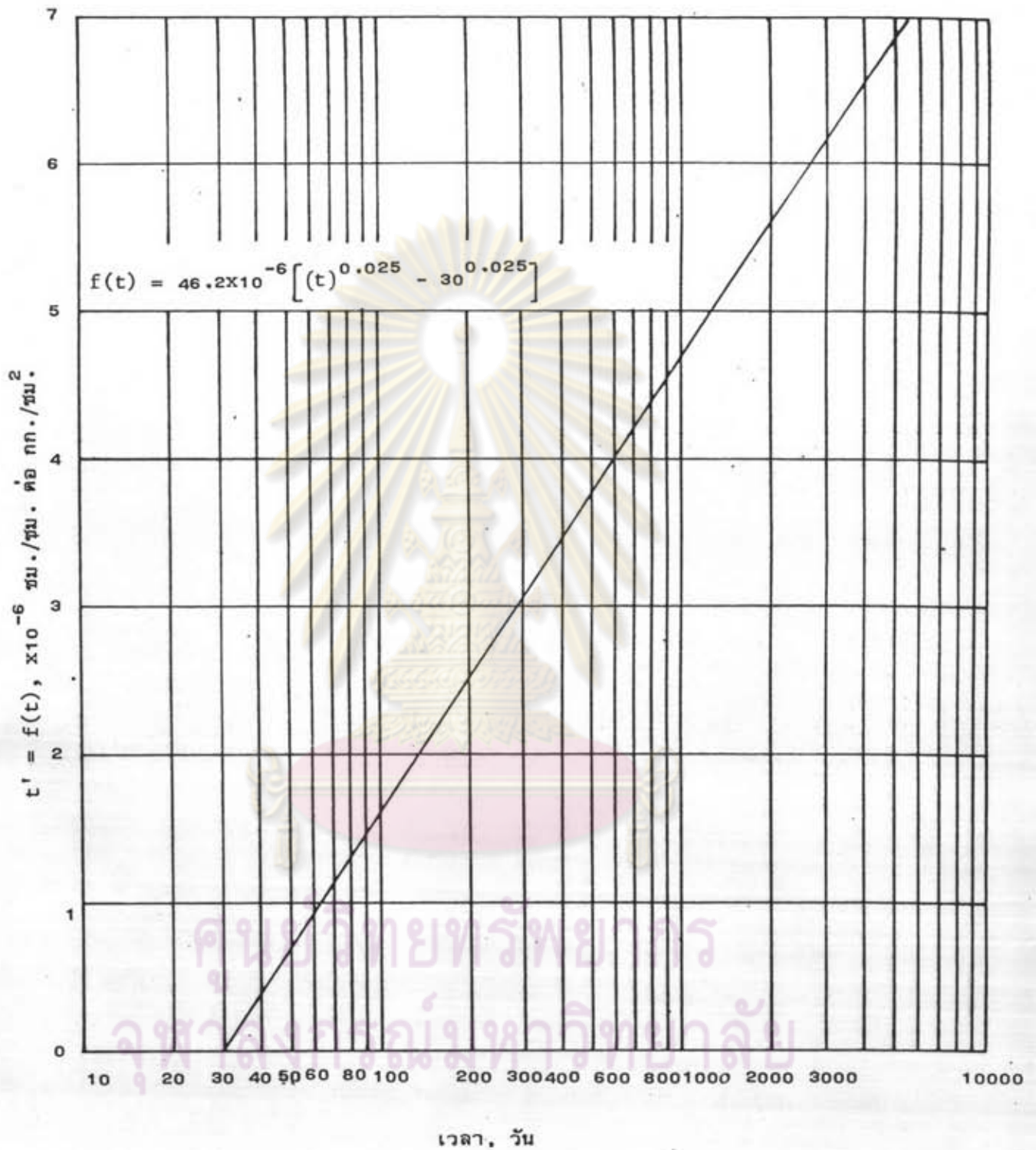
$$3. \bar{E} = (E_i, 1/(1/E_i + 3.9 \times 10^{-8} T), E_i/2) \\ = (304298, 234344, 152149)$$

$$4. \bar{E} = (E_i, E_i/3, 0) \\ = (304298, 101433, 0)$$

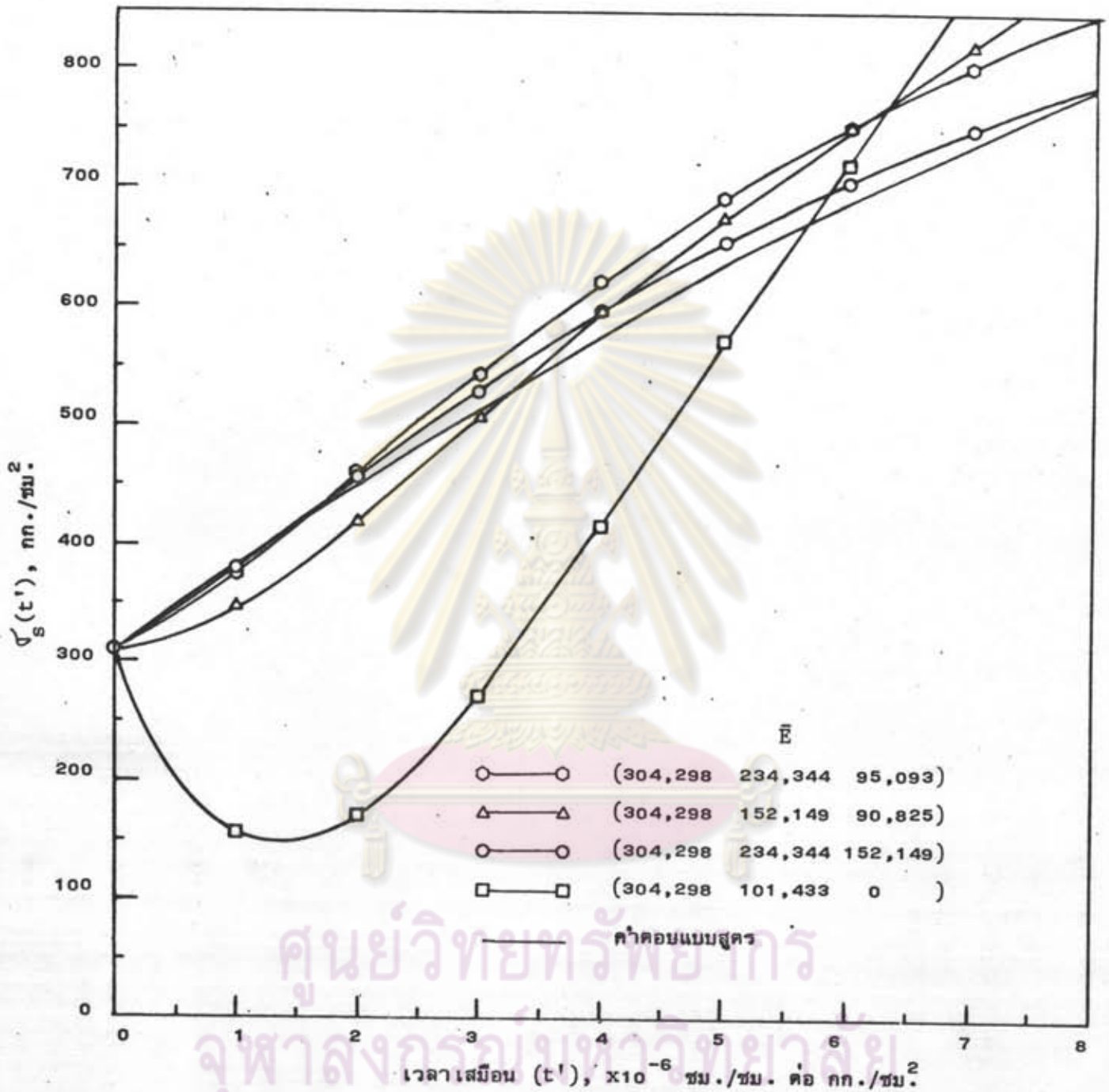
คำตอบ $\sigma_c(t')$ ซึ่งได้จากการเลือกเซตของ \bar{E} ทั้ง 4 ชุดได้แสดงไว้ในรูปที่ ก.2 เมื่อเปรียบเทียบกับคำตอบแบบสูตรจะพบว่าคำตอบที่ได้จาก \bar{E} เซตที่สามให้ผลดีที่สุด คำตอบที่ได้จาก \bar{E} เซตที่หนึ่งและสองให้ผลดีพอสมควร ส่วนคำตอบที่ได้จาก \bar{E} เซตที่สี่ให้ผลที่มีความคลาดเคลื่อนมาก เนื่องจากสมาชิกตัวที่สามของเซตนี้มีค่าค่าเกินไป ดังนั้นค่า \bar{E} ที่เลือกจึงควรอยู่ในช่วง E_i ถึง $E_i/2$ รูปที่ ก.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\sigma_c(t')$ กับ t' ซึ่งได้จากการใช้เซตของ $\bar{E} = (304298, 234344, 152149)$ และ $(304298, 152149, 95093)$



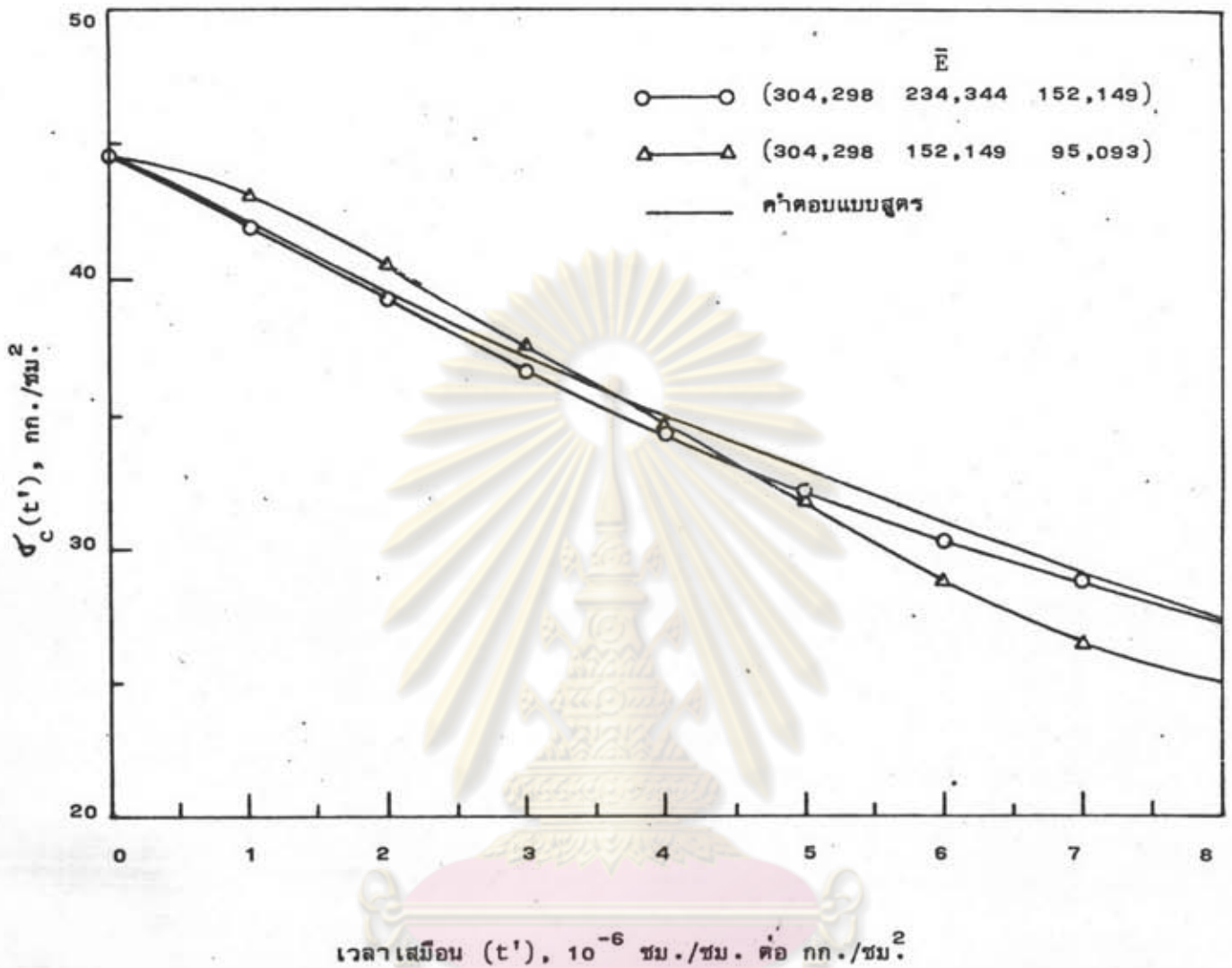
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเสมือน (t') กับ เวลา



รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงในเหล็กเสริมกับเวลาเสมือน (t')



รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดในคอนกรีตกับเวลาเสมือน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างการคำนวณการวิเคราะห์ถึงทดลองโดยทฤษฎีวิสโคอีลาสติกเชิงเส้นตรงซึ่งอาศัยหลักการสมนัย

ถึงทดลองมีการอัดแรงและการเพิ่มอุณหภูมิกระทำพร้อมกันที่อายุคอนกรีตเท่ากับ 30 วัน อุณหภูมิที่ผิวในและผิวนอกของผนังเท่ากับ 300 และ 280° เซลเซียสตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ จะแสดงหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่ผิวนอกของผนัง ($r = 85$ ซม., $z = 80$ ซม.) ภายหลังจากมี แรงและอุณหภูมิกระทำคือถึง

ในการวิจัยนี้ใช้ศรียคอมโพลแอนซมีสูตรเป็น

$$J(\underline{x}, t' - \tau') = \frac{1}{E_1(\underline{x})} + \psi(\underline{x})(t' - \tau') + g_0 [1 - \exp\{-\lambda(t' - \tau')\}] \quad (\text{ข.1})$$

โดยที่ $\psi(\underline{x}) = \frac{T}{25}$

$$g_0 = 0.638 \times 10^{-6} \quad (\text{ค้ อ กก./ซม}^2)$$

$$\lambda = 22.4 \times 10^6 \quad (\text{กก./ซม}^2)$$

จากสมการ (ข.1) อาศัยการแปลงลาปลาซจะได้

$$s\bar{J}(\underline{x}, s) = \frac{1}{E_1(\underline{x})} + \frac{\psi(\underline{x})}{s} + \frac{\lambda g_0}{s + \lambda} = \frac{1}{\bar{E}(\underline{x}, s)} \quad (\text{ข.2})$$

$$\bar{E}(\underline{x}, s) = \frac{s(s + \lambda)E_1(\underline{x})}{s^2 + u_1 s + u_0} \quad (\text{ข.3})$$

โดยที่ $u_1 = \lambda + \lambda g_0 E_1(\underline{x}) + E_1(\underline{x})\psi(\underline{x})$

$$u_0 = \lambda E_1(\underline{x})\psi(\underline{x})$$

สมมุติฟังก์ชันของค่าตอบ เป็น

$$s\bar{J}(s) = a_0 + a_1 \bar{E}(\underline{x}, s) + a_2 \bar{E}^2(\underline{x}, s) \quad (\text{ข.4})$$

จากสมการ (ข.4) อาศัยการหาค้นการแปลงลาปลาซจะได้ค่าตอบ เป็น

$$\begin{aligned} J(t') &= a_0 + \frac{a_1 E_1(\underline{x})}{(\alpha_1 - \alpha_2)} \left\{ (\lambda + \alpha_1) \exp(\alpha_1 t') - (\lambda + \alpha_2) \exp(\alpha_2 t') \right\} \\ &\quad + a_2 E_1^2 \left\{ A \exp(\alpha_1 t') + B t' \exp(\alpha_1 t') + C \exp(\alpha_2 t') + D t' \right. \\ &\quad \left. \cdot \exp(\alpha_2 t') \right\} \end{aligned} \quad (\text{ข.5})$$

โดยที่ $\alpha_1, \alpha_2 =$ รากของสมการ $s^2 + u_1 s + u_0 = 0$

$$\begin{Bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ -(\alpha_1 + 2\alpha_2) & 1 & -(\alpha_2 + 2\alpha_1) & 1 \\ 2\alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2 & -2\alpha_2 & 2\alpha_1\alpha_2 + \alpha_1^2 & -2\alpha_1 \\ -\alpha_1\alpha_2^2 & \alpha_2^2 & -\alpha_1^2\alpha_2 & \alpha_1^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} 1 \\ 2\lambda \\ \lambda^2 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

จากการวิเคราะห์ฮอลาสติกโดยวิธีไฟไนต์เอลเมนต์ได้หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่จุด $r = 85$ ซม. $z = 80$ ซม. มีค่าเป็น 3, -2 และ -8 กก./ซม.² สำหรับค่า E ของคอนกรีตเท่ากับ 300,000, 250,000 และ 200,000 กก./ซม.² ตามลำดับ
เพื่อหาค่าของ a_0 , a_1 และ a_2 เลือกเซตของ $\bar{E}(x, s)$ และ $s\bar{v}_\theta(s)$ เป็น

$\bar{E}(x, s)$	$s\bar{v}_\theta(s)$
300,000	3
250,000	-2
200,000	-8

แทนค่า $\bar{E}(x, s)$ และ $s\bar{v}_\theta(s)$ ลงในสมการ (ข.4) จะได้สมการ 3 สมการ แก่สมการเหล่านี้จะได้

$$\begin{aligned} a_0 &= -42 \\ a_1 &= 0.00021 \\ a_2 &= -2 \times 10^{-10} \end{aligned}$$

เมื่อแทนค่าคงที่ต่าง ๆ ลงในสมการ (ข.5) ในที่สุดได้คำตอบของ $v_\theta(t')$ เป็น

$$\begin{aligned} v_\theta(t') &= -42.0 + 5.45 \exp(-27,289,362t') + 39.55 \exp \\ &\quad (-2,757,998t') + 19.513 \times 10^6 t' \exp \\ &\quad (-27,289,362t') + 31.827 \times 10^6 t' \exp \\ &\quad (2,757,998t') \end{aligned} \quad (\text{ข.6})$$

หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงที่เวลาใด ๆ ภายหลังจากมีแรงและอุณหภูมิกระทำหาได้โดยแทนค่า

$$t' = 46.2 \times 10^{-6} \left[(t)^{0.025} - 30^{0.025} \right] \quad \text{รูปที่ 4.12 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง}$$

$v_\theta(t)$ กับ t โดยเลือกเซตของ $\bar{E}(x, s)$ ต่าง ๆ

ภาคผนวก ค

การหาแรงดึงประสิทธิผล

เหล็กเสริมอัดแรงชนิด เชือกเหล็กลวด 7 เส้น $\phi \frac{1}{2}$ นิ้ว เกรด 270K

กำลังดึงประลัย 18739 กก

การคำนวณหาการเสื่อมสูญของการอัดแรง เนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ

1. การสูญเสียการอัดแรงเนื่องจากความฝืด (friction)

สัมประสิทธิ์ความฝืดเนื่องจากความโค้ง (μ) = 0.15 คอ เรเดียน

สัมประสิทธิ์ความฝืดเนื่องจากความคด (k) = 0.0033 คอ เมตร

มุมโค้ง (θ) = $\frac{\pi}{3}$ เรเดียน

ความยาว (l) = 0.89 ม.

แรงดึงที่หัวยึด (F_0) = 14990 กก.

$$\begin{aligned} \Delta F_{p,f} &= F_0 [1 - \exp(-\mu\theta - kl)] \\ &= 14990 [1 - \exp(-0.15 \times \frac{\pi}{3} - 0.0033 \times 0.89)] \\ &= 2216 \text{ กก.} \end{aligned}$$

2. การสูญเสียการอัดแรงเนื่องจากการเซตตัวของลิมยึด

สำหรับ เหล็กเสริมแนวตั้งมีความยาว 155 ซม.

การสูญเสียแรงดึงต่อการเซตตัว 1 มม. = $\frac{0.98 \times 200000}{155} = 1264$ กก.

สำหรับหัวยึดทั่วไปมีการเซตตัว 6 มม.

ดังนั้นการสูญเสียการอัดแรง = $6(1264) = 7584$ กก.

เพราะว่าการสูญเสียนี้มีขนาดสูง ในทางปฏิบัติอาจช่วยให้มีค่าน้อยลงได้โดยการสอดแผ่นเหล็ก (shim) ระหว่างหัวยึดและแผ่นเหล็กรองหัวยึด ในที่นี้สมมุติว่าหลังจากสอดแผ่นเหล็กแล้ว

การสูญเสียการอัดแรงมีขนาด = 1650 กก.

ส่วน เหล็กเสริมแนวเส้นรอบวงก็ทำนองเดียวกัน แต่สมมุติว่าการสูญเสียการอัดแรงมีค่าเป็นศูนย์ หลังจากสอดแผ่นเหล็กแล้ว

3. การสูญเสียการอัดแรงเนื่องจากการหดตัวในช่วงอีลาสติกของคอนกรีต (elastic

shortening) มีค่าน้อยโดยเฉลี่ยแล้วเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์

$$\begin{aligned}\Delta F_{p,e} &= 0.01 (14990 - 2216) \\ &= 130 \quad \text{กก.}\end{aligned}$$

4. การเสื่อมสยการอัดแรงเนื่องจากการคืบและหดตัวของคอนกรีต (creep and shrinkage)

การคืบรวมทั้งการหดตัวของคอนกรีตที่อุณหภูมิ 315° เซลเซียสที่เวลา 1 ปี⁽⁵⁾

$$= 32.32 \times 10^{-6} \quad \text{ชม./ชมคือ กก./ชม}^2$$

การคืบที่เวลา 1 ปีเป็น 0.74 เท่าของการคืบสูงสุด⁽²⁶⁾

$$\text{ดังนั้นการคืบสูงสุด} = \frac{32.32 \times 10^{-6}}{0.74} = 43.68 \times 10^{-6} \quad \text{ชม./ชม.}$$

หน่วยแรงของคอนกรีตที่ตำแหน่งเหล็ก เป็นผลเนื่องจากการอัดแรงและอุณหภูมิ

$$\text{(อุณหภูมิที่ถือ เป็นฐาน เท่ากับ 100° ซ)} = -33 + \left(\frac{100}{300} \times 33\right) = -22 \quad \text{กก./ชม}^2$$

$$\text{การคืบและการหดตัวของคอนกรีต} = 22 \times 43.68 \times 10^{-6} = 961 \times 10^{-6} \quad \text{ชม./ชม.}$$

$$\text{หน่วยแรงดึงที่เสื่อมสย} = 961 \times 10^{-6} \times 2.0 \times 10^{-6}$$

$$= 1922 \quad \text{กก./ชม}^2$$

$$\text{แรงดึงที่เสื่อมสย} \quad \Delta F_{p,cr,sh} = 1922 \times 0.98 = 1883 \quad \text{กก.}$$

5. การเสื่อมสยการอัดแรงเนื่องจากการผ่อนคลาย (relaxation) เนื่องจากไม่พบข้อมูลใหม่จึงจำเป็นต้องใช้วิธีกะประมาณ สำหรับเหล็กประเภทการผ่อนคลายต่ำ (low relaxation) เมื่อมีแรงดึง 70 เปอร์เซ็นต์จะมีการเสื่อมสยแรงดึงที่ 1000 ชั่วโมงไม่เกิน 2.5 เปอร์เซ็นต์ สมมุติว่าที่อุณหภูมิ 200° เซลเซียส การผ่อนคลายเพิ่มเป็น 8 เท่าซึ่งเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์

$$\text{ดังนั้น} \quad \Delta F_{p,r} = 0.20 (14990 - 2216) = 2554 \quad \text{กก.}$$

$$\text{แรงดึงในแนวเส้นรอบวงขณะถ่ายแรง} = 14990 - \Delta F_{p,f} - \Delta F_{p,e}$$

$$\begin{aligned}F_{pi} &= 14990 - 2216 - 130 \\ &= 12644 \quad \text{กก.}\end{aligned}$$

$$\text{แรงดึงประสิทธิผลในแนวเส้นรอบวง} = F_{pi} - \Delta F_{p,cr,sh} - \Delta F_{p,r}$$

$$F_{pe} = 12644 - 1883 - 2554$$

$$F_{pe} = 8207 \quad \text{กก.}$$

$$\text{แรงดึงในแนวตั้งขณะถ่ายแรง} = 14990 - \Delta F_{p,anch} - \Delta F_{p,e}$$

F_{pi}	=	14990 - 1650 - 130	
F_{pi}	=	13210	กก.
แรงดึงประสิทธิผลในแนวตั้ง	=	$14990 - \Delta F_{p,cr,sh} - \Delta F_{p,r}$	
F_{pe}	=	13210 - 1883 - 2554	
F_{pe}	=	8773	กก.

สรุป

แรงดึงเริ่มแรก (F_0)	=	14990 กก. (80.0% F_{pu})
สูญเสียจากความผิด	=	2216 กก. (14.8% F_0)
สูญเสียจากการเซตตัวของลิ่มยึด	=	1650 กก. (11.0% F_0)
สูญเสียจากการหดตัวอิลาสติก	=	130 กก. (0.9% F_0)
เสื่อมสูญเสียจากการคืบและการหดตัว	=	1883 กก. (12.6% F_0)
เสื่อมสูญเสียจากการม้วนคลาย	=	2554 กก. (17.0% F_0)
แรงดึงในแนว เส้นรอบวงขณะถ่ายแรง	=	12644 กก. (84.3% F_0) . (67.5% F_{pu})
แรงดึงประสิทธิผลในแนว เส้นรอบวง	=	8207 กก. (54.7% F_0) . (43.8% F_{pu})
แรงดึงในแนวตั้งขณะถ่ายแรง	=	13210 กก. (88.1% F_0) . (70.5% F_{pu})
แรงดึงประสิทธิผลในแนวตั้ง	=	8773 กก. (58.5% F_0) . (46.8% F_{pu})

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบ เชือกเหล็กขนาด 7 เส้น $\phi \frac{1}{2}$ นิ้ว เกรด 270K

ก. เหล็กจากโรงงาน

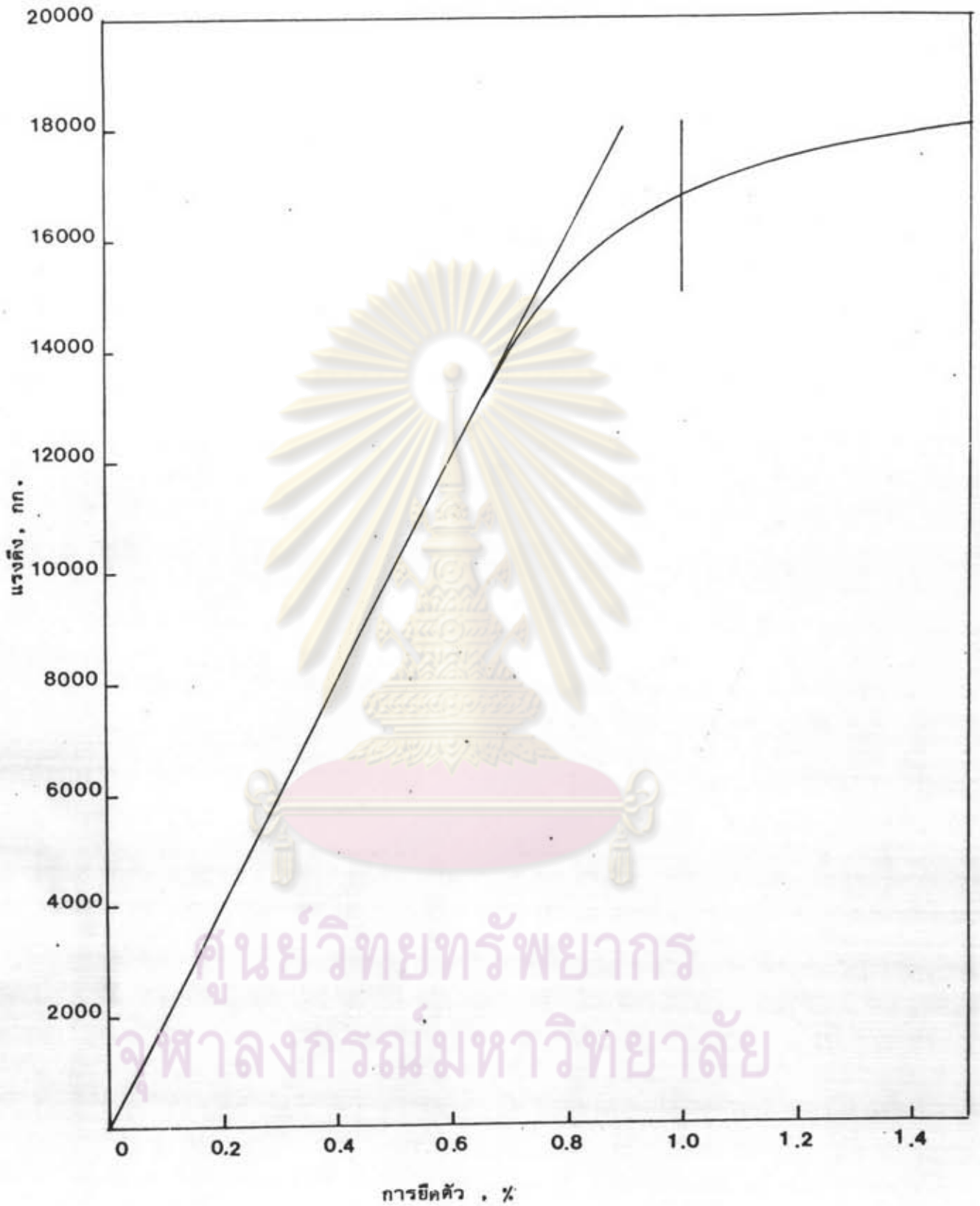
ลำดับที่	เส้นผ่าศูนย์กลาง มม.	แรงดึง ประลัย กก.	แรงดึงที่ การยืดตัว 1% 1%,กก.	การยืดตัว %	ระยะ เกลียว มม.	โมดูลัส ยืดหยุ่น กก./ซม. ²
1	12.90	19400	17300	6.5	143	-
2	12.82	18800	16800	6.9	143	2000000
3	12.84	18800	16900	7.5	145	2000000
4	12.83	18750	17000	8.2	148	-
5	12.84	18800	17000	7.0	145	-
เฉลี่ย	12.85	18910	17000	7.2	145	2000000

การเสื่อมสูญแรงดึง เนื่องจากการผ่อนคลายที่ 100 ชั่วโมง เท่ากับ 3.83%

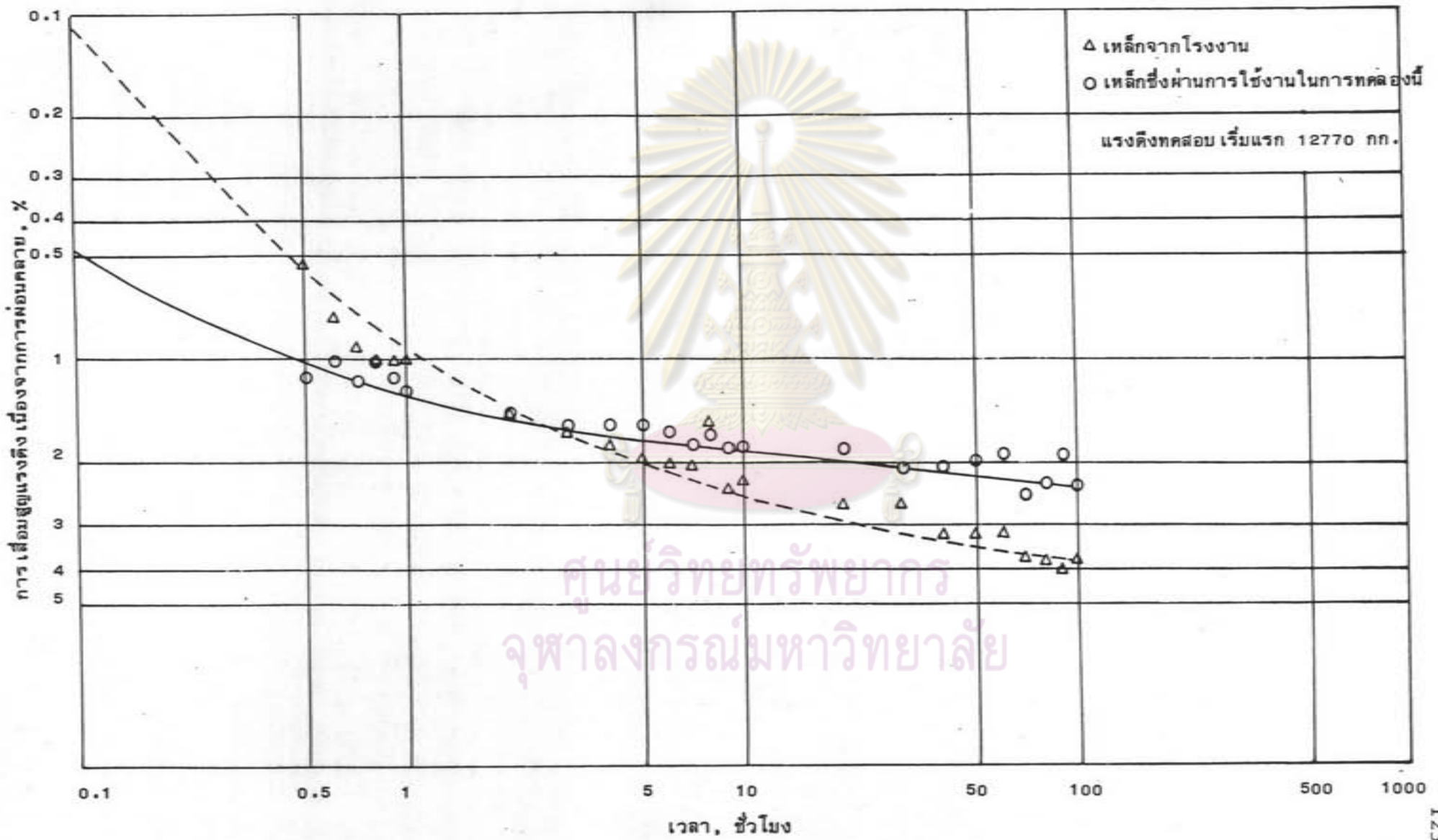
ข. เหล็กที่ผ่านการใช้ในการทดลองนี้

ลำดับที่	เส้นผ่าศูนย์กลาง มม.	แรงดึง ประลัย กก.	แรงดึงที่ การยืดตัว 1% กก.	การยืดตัว %	ระยะ เกลียว มม.	โมดูลัส ยืดหยุ่น กก./ซม. ²
1	12.80	19300	17600	7.1	167	1950000
2	12.80	18700	17000	6.7	182	1990000
3	12.85	18750	17200	7.1	184	1950000
4	12.90	19100	17000	7.3	185	1910000
5	12.92	19500	17500	7.0	187	1990000
6	12.92	19100	17200	7.2	184	1880000
เฉลี่ย	12.86	19075	17250	7.1	182	1945000

การสูญเสียแรงดึง เนื่องจากการผ่อนคลายที่ 100 ชั่วโมง เท่ากับ 2.34%



รูปที่ ง.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและการยืดตัวของเหล็ก $\phi \frac{1}{2}$ " 7 - wire strand, 270K



ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ง.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเสื่อมสูญแรงดึง เนื่องจากการอ่อนคลายกับ เวลาของเหล็ก $\phi \frac{1}{2}$ 7 - wire strand, 270K

ภาคผนวก จ

การทดสอบสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนของปูนทรายและความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่เกิดขึ้นจริงและความเครียดที่ได้จาก เกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้า

วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้คือ

1. เพื่อหาสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนของปูนทราย
2. เพื่อทดสอบสมรรถนะของ เกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้า เมื่อมีการ เพิ่มอุณหภูมิ
3. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่เกิดขึ้นจริงและความเครียดที่ได้จาก เกจ

วัดความเครียดแบบไฟฟ้า

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองมีดังต่อไปนี้

1. เคาอบ อุณหภูมิสูงสุด 260° เซลเซียส
 2. เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทสำหรับวัดอุณหภูมิใน เคาอบ อุณหภูมิที่อ่านได้ 0 ถึง 320° เซลเซียส ความละเอียด 2° เซลเซียส (1 ซิค)
 3. เครื่องวัดความเครียดแบบไฟฟ้า รุ่น SM-60D ยี่ห้อ KYOWA
 4. กล้องสวิตซ์และปรับสมดุล รุ่น SS24R ยี่ห้อ KYOWA
 5. ที่วัดการเปลี่ยนแปลงความยาวของแท่งตัวอย่าง โดยใช้เกจวัดระยะ (dial gauge) ความละเอียด 0.0001 นิ้ว (1 ซิค)
 6. เกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้า ชนิด N-123A ยี่ห้อ TML
 7. กาวติดเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้าชนิด AS ยี่ห้อ TML
- การเตรียมแท่งตัวอย่าง

ส่วนผสมปูนทราย เหมือนที่ใช้ทำดังทดลอง อัตราส่วนซีเมนต์ต่อทราย 0.647 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 ใช้แบบหล่อเป็นเหล็ก 3 ด้าน เมื่อหล่อแล้วได้แท่งตัวอย่างกว้าง 2.57 ซม. หนา 2.54 ซม. ยาว 28.67 ซม. ส่วนหัวท้ายฝังน๊อตขนาด $\phi \frac{1}{8}$ นิ้ว ยาว $\frac{1}{2}$ นิ้ว ให้ปลายโผล่ประมาณ $\frac{1}{8}$ นิ้ว วางแบบหล่อให้แกนของแท่งตัวอย่างอยู่ในแนวราบ ใส่ปูนทราย เกลี่ยและกระทุ้งให้แน่น ใช้เกรียงเหล็กปาดผิวหน้าให้เรียบ ใช้ค้อนเคาะข้างแบบเบา ๆ ให้ปูนทรายแน่นขึ้น ปล่อยให้แห้งตัว 1 วันแล้วแกะแบบนำแท่งตัวอย่างไปเก็บไว้ในห้องไอน้ำ 9 วัน

นำแท่งตัวอย่างออกจากห้องไอน้ำ ปล่อยให้แห้งในอากาศ 3 วัน ชัดผิวด้านที่ใช้เกรียง

ปาดด้วยหินขัดและกระดาษทราย เช็ดฝุ่นด้วยคาร์บอนเตตราคลอไรด์ ถ้ามีรูพองอากาศใช้อีพ็อกซี
อุด รอให้อีพ็อกซีแข็งตัว 1 วัน ชัดผิวให้เรียบอีกครั้ง ถ้าพบรูพองอากาศตรงที่จะติด เกจวัดความ
เครียดแบบไฟฟ้า ต้องอุดด้วยอีพ็อกซีใหม่ จนกระทั่งผิวเรียบดีและไม่มีรูพองอากาศ

ทำความสะอาดผิวด้วยคาร์บอนเตตราคลอไรด์ นำเกจวัดความเครียดที่ติดกับ เทปใส
ปิดลงไปให้ตรงตำแหน่งที่ต้องการ แล้วเปิดขึ้นทากาว AS ทั้งบนแท่งตัวอย่างและตัวเกจ ใช้กระดาษ
ทิชชูหนา ๆ รีดปิดให้สนิท อัดให้แน่นด้วยที่บีบชนิดชั้นสกรูทิ้งไว้ 1 วันจึงลอกเทปออก เชื่อมสายไฟ
ทาสิลิโคน (silicone) เคลือบบนตัวเกจและขั้วต่อสายไฟเพื่อกันความชื้นจากอากาศภายนอก รวม
เวลา 8 วันนับจากเอาแท่งตัวอย่างออกจากห้องไอน้ำ

การทดลอง

นำแท่งตัวอย่างใส่ในเตาอบแต่ต่อสายไฟมาเข้ากล่องสวิตซ์และปรับสมดุล ควบคุมอุณหภูมิ
ภายในเตาอบให้คงที่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง บันทึกค่าความเครียดและอุณหภูมิภายในเตาอบ เอาแท่ง
ตัวอย่างออกจากเตาอบ เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวโดยเร็วที่สุดซึ่งจะไม่เกิน 10 วินาที
แล้วนำกลับเข้าไว้ในเตาอบดังเดิม ปรับอุณหภูมิให้สูงขึ้นประมาณ 20° เซลเซียส รักษาอุณหภูมิให้
คงที่ 1 ชั่วโมงแล้วบันทึกค่าอย่างเดิม จนในที่สุดถึงอุณหภูมิ 264° เซลเซียส ต่อไปจะปรับอุณหภูมิ
ให้ต่ำลงพร้อมกับบันทึกค่าต่าง ๆ เหมือนเดิม

หลังจากอุณหภูมิของแท่งตัวอย่างกลับคืนสู่อุณหภูมิห้องแล้ว นำแท่งตัวอย่างใส่เข้าที่วัดการ
เปลี่ยนแปลงความยาว เพื่อวัดการขยายตัวกลับของแท่งตัวอย่างภายในเวลา 18 วันต่อมา

ผลการทดลอง

1. ความเครียดที่คำนวณจากการ เปลี่ยนแปลงความยาวของแท่งตัวอย่างขณะอุณหภูมิ เพิ่มขึ้น
มีค่าเป็น 10.2×10^{-6} ชม./ชม. ต่อ° เซลเซียส เมื่อแท่งตัวอย่างมีอุณหภูมิ เพิ่มขึ้นแล้วกลับลดลงถึง
อุณหภูมิห้องก็จะมี การหดตัวเกิดขึ้น 850×10^{-6} ชม./ชม. ดังรูปที่ จ.1 และใช้เวลา 18 วันในอากาศ
ขยายตัวกลับคืนสู่ความยาวครั้งแรก
2. ความเครียดที่ได้จาก เกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้าบนแท่งตัวอย่างขณะอุณหภูมิ เพิ่มขึ้น
มีค่าเป็น 40.9×10^{-6} ชม./ชม. ต่อ° เซลเซียส เมื่อแท่งตัวอย่างมีอุณหภูมิ เพิ่มขึ้นแล้วกลับลดลงถึง
อุณหภูมิห้องก็จะมี การขยายตัวเกิดขึ้น 880×10^{-6} ชม./ชม. ดังรูปที่ จ.1
3. จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่ได้จาก เกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้า

กับความเครียดที่ได้จากการวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวในรูปที่ จ.2 จะได้ว่า

$$\text{เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น} \quad \epsilon_g = 4.0103 \epsilon' + 90.7 \quad (1)$$

$$\epsilon_g = 3.0867 \epsilon' + 3663.4 \quad (2)$$

โดยที่ ϵ_g = ความเครียดที่ได้จากเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้า

ϵ' = ความเครียดที่ได้จากการวัดการเปลี่ยนแปลงความยาว

ความเครียดที่เกิดขึ้นจริงถือว่าเท่ากับความเครียดที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงความยาว ดังนั้นเราจะ
 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดจริงและความเครียดที่ได้จากเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้า เป็น
 ดังนี้

$$\text{เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น} \quad \epsilon = 0.24936 \epsilon_g - 22.6 \quad (3)$$

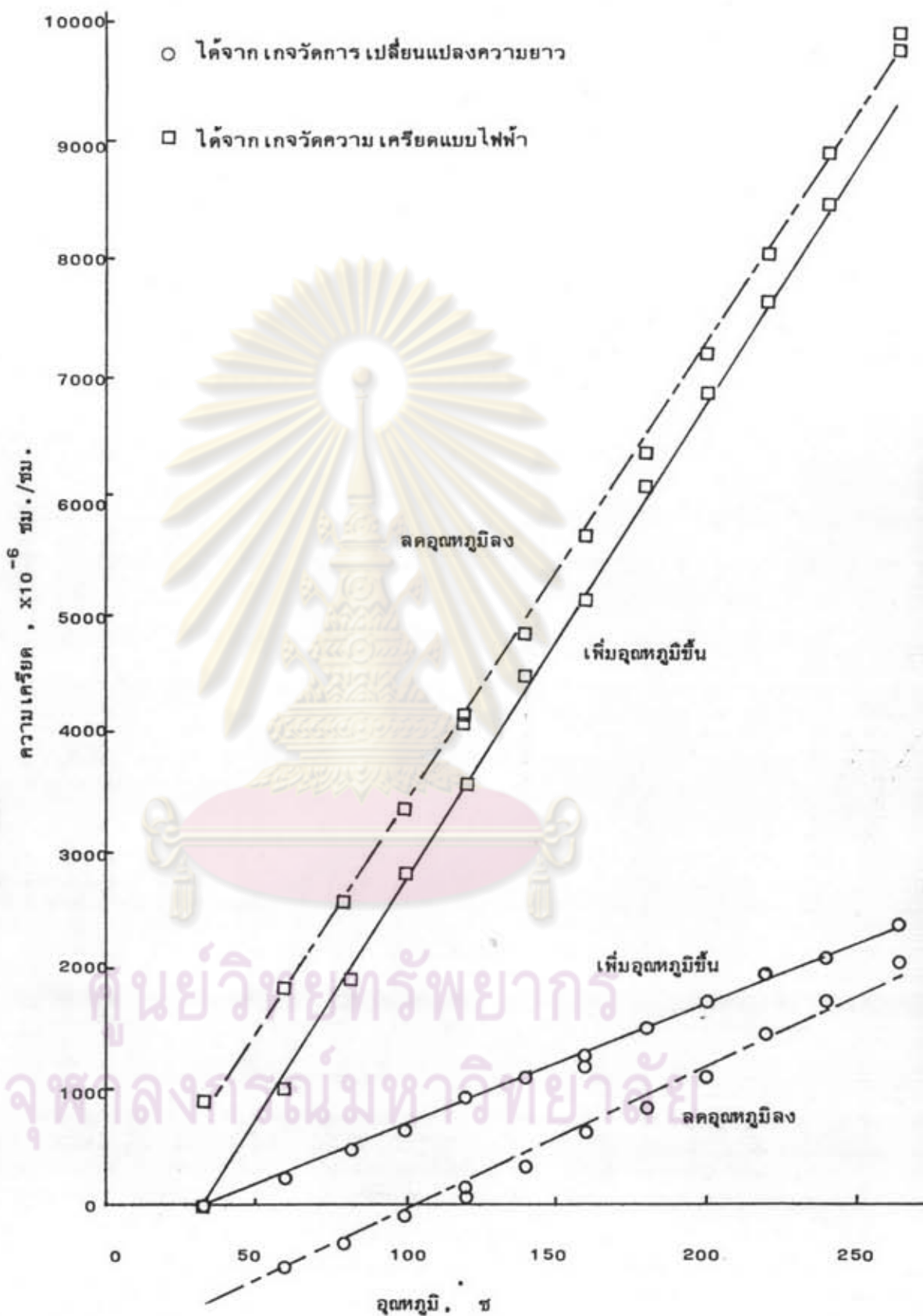
$$\text{เมื่ออุณหภูมิลดลง} \quad \epsilon = 0.32397 \epsilon_g - 1186.8 \quad (4)$$

โดยที่ ϵ = ความเครียดจริง

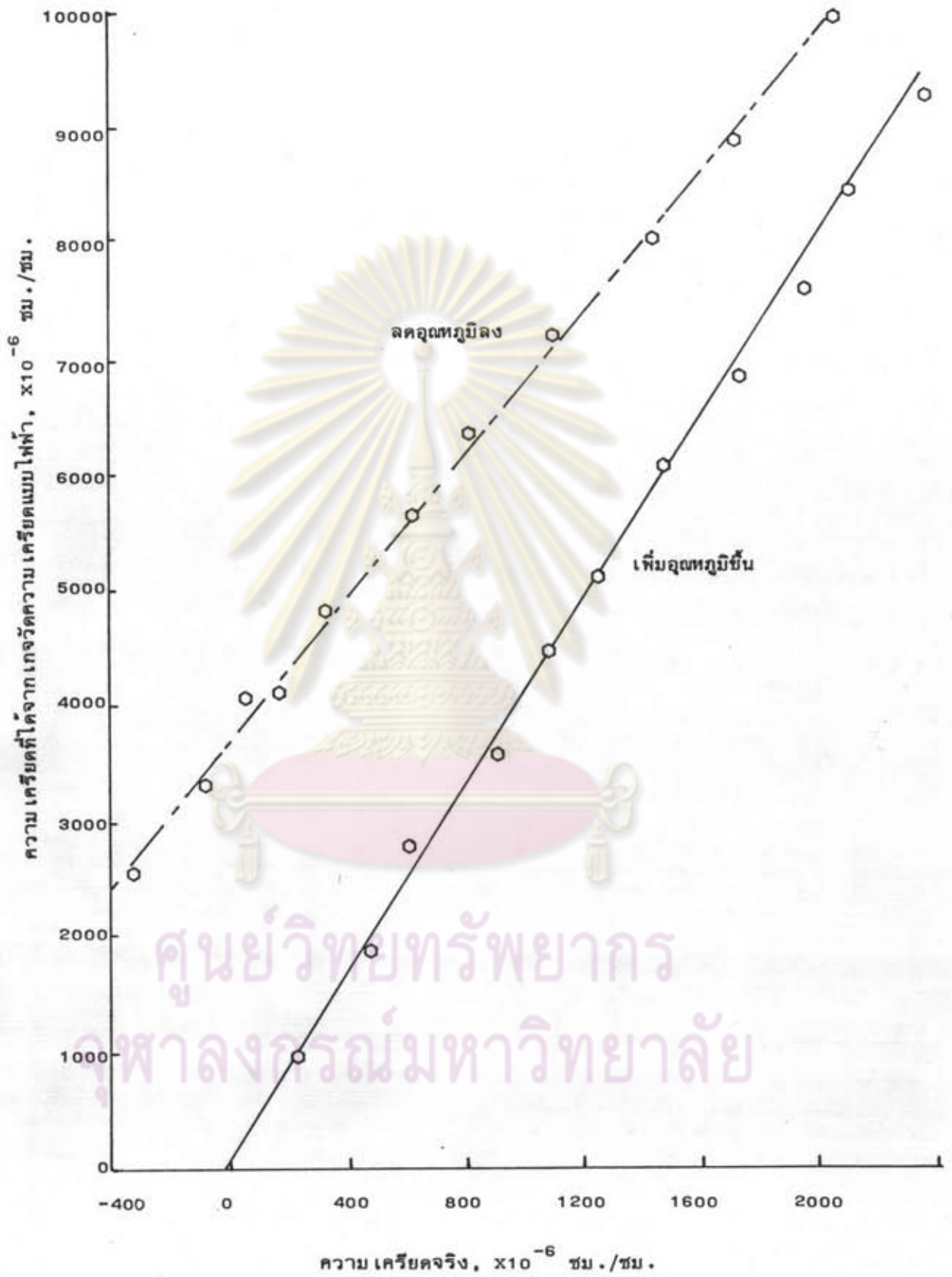
ในการทดลองวัดความเครียดของคอนกรีตที่ถึงทดลองจะให้ความเครียดจริงซึ่งประกอบด้วยความเครียด
 เนื่องจากหน่วยแรงและความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เป็นไปตามสมการที่ 3



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ จ.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความ เครียดกับอุณหภูมิจ



รูปที่ จ.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค็ยคที่ไ้จากเกจวัดความเค็ยคแบบไฟฟากับความเค็ยคจริง

ประวัติผู้เขียน

นายอภิชาติ ยุคคานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 6 มกราคม พ.ศ. 2500 สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยปี
การศึกษา 2521 ทำหน้าที่ผู้ช่วยสอนวิชาปฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics) ปีการศึกษา
2522 ทำหน้าที่ผู้ช่วยสอนวิชา Structure Lab และ Experimental Problems in C.E.
ปีการศึกษา 2524 และได้รับทุนอุดหนุนโครงการวิจัยหรือค้นคว้าเพื่อทำวิทยานิพนธ์ของบัณฑิตวิทยาลัย
ในปีการศึกษา 2523 และทุนมูลนิธินิสิตเก่าจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2524

พ.ศ. 2525 ทำงานที่บริษัท ดีเวลอปเม้นท์เอนจิเนียริง สะ เป เซียสลิสท์ จำกัด
(Development Engineering Specialist Co., Ltd.) ในตำแหน่งวิศวกรโครงสร้างและ
ผู้เขียนโปรแกรมไมโครคอมพิวเตอร์ สำหรับงานวิเคราะห์โครงสร้างต่าง ๆ



ศูนย์วิทยพัชร์พยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย