



เอกสารอ้างอิง

1. นเรศร์ จันทน์ขาว การศึกษาการวัดความชื้นของอิฐด้วยเทคนิคนิวเคลียร์ เพื่อประโยชน์ในการอนุรักษ์โบราณสถาน ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรกฎาคม 2526
2. อุไรวรรณ จุฬภาค นิวเคลียร์ฟิสิกส์ โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพฯ PH424/20472/18
3. Robin P. Gradner, and Ralph. L. Ely, Jr. Radioisotope Measurement Application in Engineering Reinhold Publishing Corporation, New York, 1967.
4. นเรศร์ จันทน์ขาว Basic Nuclear Technology เอกสารประกอบคำสอน วิชา 172-540 ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526
5. อุไรวรรณ จุฬภาค Reactor Physics โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพฯ PH426, 23229-17
6. John R. Lamarch Introduction to Nuclear Engineering Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Co., 1975.
7. L.F. Curtiss Introduction to Neutron Physics Published by Affiliated East-West Press PVT. LTD., New Delhi, 1959.
8. อุไรวรรณ จุฬภาค การกระจายของนิวตรอนเข้าในตัวกลาง ซึ่งเป็นของผสมระหว่างน้ำและของแข็ง วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ฯ 2521
9. Samuel Glasstone and Alexander Sesonske Nuclear Reactor Engineering Published by D. Van Nostrand Company (Canada), LTD., 1967.
10. ปรีชา เทียนสมประสงค์ การกระจายของนิวตรอนจากตัวกำเนิดขนาดจุดในน้ำ วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2517
11. G.L. Squires Introduction to the Theory of Thermal Neutron Scattering Published by the Syndies of the Cambridge University Press, London, 1978.
12. วิชัย หโยดม, ปรีชา การสุทธิ "เครื่องวัดความชื้นในดิน หลักการ วิธีใช้ และข้อควรระวัง" THAI.AEC-20 สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ 2511
13. International Atomic Energy Agency-Technical Reports Series No.130 Commercial Portable Gauges for Radiometric Determination of the Density and Moisture Content of Building Materials Vienna, 1971.
14. J. Tolgyessy and S. Varga Nuclear Analytical Chemistry IV : Analysis Based on the Interaction of Nuclear Radiation with Matter VEDA, Publishing

- House of the Slovak Academy of Sciences, Bratislava, Czechoslovakia, 1975.
15. Geoffrey G.Eichholz and John W.Poston Neutron Detection from Principles of Nuclear Radiation Detection Ann Arbor Science Publishers, Inc., New York, 1979.
 16. Glenn F.Knoll Radiation Detection and Measurement John Wiley and Sons, New York, 1979.
 17. K.S.Ram, and R.Rammana Basic Nuclear Engineering Wiley, New Delhi, 1977.
 18. James J.Duderstadt, and .Louis J.Hamilton Nuclear Reactor Analysis Wiley, New York, 1976.
 19. Theodore Rockwell III Reactor Shielding Design Manual McGraw-Hill Book Company, New York, 1956.
 20. Harold Etherington, Editor Nuclear Engineering Handbook McGraw-Hill Book Company, New York, 1958.
 21. G.W.Gee, J.F.Stiver, and H.R.Bochert "Radiation Hazard from Americium-Beryllium Neutron Moisture Probes" Soil.Sci.Am.J. Vol.40, 1976.
 22. วิทยา เพียรวิจิตร, ฉลอง เกิดพิทักษ์, วรณศิริ บุญรัตน์พันธ์ วัสดุการก่อสร้าง : การผลิต สมบัติการให้ และการทดสอบวัสดุก่อสร้าง สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์ กรุงเทพฯ, พิมพ์ครั้งที่ 2 2524
 23. Annual Book of ASTM Standards Standard Method of Test for Moisture Content of Soil and Soil-Aggregate in place by Nuclear Methods (Shallow Depth) Designation : D 3017-72, Part 19, 1972.
 24. Annual Book of ASTM Standards Standard Method of Laboratory Determination of Moisture Content of Soil : D 2216-71, Part 19, 1972.
 25. Japanese Industrial Standard Method of Test for Moisture Content of Soils JIS A 1203, 1978.
 26. Deuthches Institut fur Normung Physical Laboratory Tests Determination of water content of soil DIN 19683, Part 4, 1973.
 27. British Standards Institution Methods of Test for Stabilized soil BS 1924 : 1975.
 28. British Standards Institution Methods of Test for Soil for civil engineering purposes BS 1377 : 1975.
 29. กัญญา ทองเฉลิม ปรุณีกลศาสตร์ 1 : Soil Mechanics 1 วิทยาเขตอุเทนถวาย 2527
 30. จุมพล คินตัก, ธงชัย นิ่งรัมย์, ภิกข วสุวานิช ดิน เอกสารเศรษฐธรณีวิทยา เล่มที่ 19

กองเศรษฐกิจธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี 2521

31. ชัย มุกตพันธ์, คาซุโตะ นาคาซาวา ปฐพีกลศาสตร์ และ วิศวกรรมฐานราก สมาคมส่งเสริมความรู้
ด้านเทคนิคระหว่างประเทศ 2526
32. ดิเรก ลาวัญศิริ, บุญสม เลิศหิรัญวงศ์ ปฐพีวิศวกรรมในการก่อสร้าง : Soil Engineering in
Construction ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ครั้งที่ 1 2525
33. สง่า ตั้งขวาล ธรณีวิศวกรรมพื้นฐาน : Engineering Geology ฉบับแก้ไขปรับปรุงใหม่ ฉบับปรับ
ปรุง 2424
34. สำออง ศรีนิลทา คู่มือปฏิบัติการ ปฐพีศาสตร์เบื้องต้น ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์ พิมพ์ครั้งที่ 2 2517
35. เอ็ม เขียวรัตน์ การสำรวจดิน Soil Survey เล่มที่ 2 เทคนิคในการสำรวจและจำแนกดิน ,
Part 2 Techques in Soil Survey and Classification ภาควิชาปฐพีวิทยา
คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2527
36. G.W.Gray, B.D.Sowerby, and G.P.Youdale In-stitu Determination of Moisture
in Road Pavement by Nuclear Methods Australian Atomic Energy
Commission Research Establishment Lucas Heights, April, 1981.
37. D.J.Wilson and A.I.M.Ratichie Neutron Moisture Meters : The Dependence of
thier Response on Soil Parameters Aust.J.Soil Res., 1986.
38. J.S.Charlton Radioisotope Techniques for Problem-Solving in Industrial
Process Plants Published by Leonard Hill, London, 1986.
39. National Health and Medical Research Council Code of Praticce for the Safe
Use of Soil Density and Moisture Gauges Containing Radioactive Source
(1984) Reprinted from the report of 98th. Session of the Council,
October 1984, Australian Government Publishing Service, Canberra,
1986.

ภาคผนวก ก

ตารางผลการทดลองการสร้างกราฟเปรียบเทียบของอิฐมอญ

ผลการทดลองเพื่อสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นในอิฐมอญ กับจำนวนน้ำรังสี
เฉลี่ยสุทธิซึ่งมีข้อมูลทั้งหมด 99 ข้อมูล จาก 7 ชุด การทดลอง ดังแสดงในตารางดังต่อไปนี้
ตารางข้อมูลของจำนวนน้ำรังสีเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นในอิฐมอญ

แบบคราวันต์			จำนวนน้ำรังสี ต่อ 100 วินาที						เปอร์เซ็นต์ความ ชื้นที่ได้จากการ คำนวณ (%)
จำนวนน้ำ/100 ครั้งที่ 1	2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
311	304	308	2435	2453	2420	2445	2430	2437	37.94
339	345	342	2499	2482	2474	2485	2460	2480	36.01
333	351	342	2440	2424	2442	2435	2411	2430	35.44
366	345	356	2449	2430	2455	2460	2423	2443	35.21
323	330	327	2404	2438	2456	2428	2410	2429	35.11
355	336	346	2468	2472	2460	2449	2455	2461	35.10
331	314	323	2475	2480	2493	2455	2461	2473	34.89
372	359	366	2398	2406	2400	2390	2489	2416	33.76
368	345	357	2411	2400	2409	2416	2401	2407	33.45
322	331	327	2402	2422	2410	2395	2400	2406	33.36
306	321	314	2360	2344	2371	2339	2355	2354	32.98
344	349	347	2335	2321	2348	2350	2340	2339	32.78
341	353	347	2338	2348	2350	2341	2327	2341	32.49
350	340	345	2222	2241	2216	2240	2235	2231	31.11
350	328	339	2128	2139	2150	2116	2135	2134	30.68
355	361	358	2140	2136	2148	2112	2119	2131	30.29
311	307	309	2119	2137	2148	2122	2110	2127	30.26
326	340	333	2055	2060	2071	2066	2059	2062	28.64
329	351	340	2030	2014	2023	2006	2041	2023	27.76

ตาราง (ต่อ)

แบบคร่าวด์ จำนวนนับ/100 วินาที			จำนวนนับรังสี ต่อ 100 วินาที						เปอร์เซ็นต์ความ ขึ้นที่ได้จากการ คำนวณ (%)
ครั้งที่ 1	2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
340	360	350	2035	2019	2025	2036	2053	2034	27.74
344	330	337	2001	2020	2014	2006	2017	2012	27.71
325	335	330	2032	2016	2030	2049	2043	2034	27.62
360	351	356	1995	1978	1984	1986	1970	1983	26.67
339	357	348	1997	1980	1988	1993	1970	1986	25.56
350	331	341	1978	1966	1959	1970	1974	1968	24.95
319	338	329	1959	1945	1972	1966	1950	1958	24.41
322	325	324	1930	1921	1931	1910	1906	1920	24.40
331	339	335	1921	1910	1900	1906	1914	1910	24.40
326	335	331	1881	1862	1866	1874	1859	1868	23.22
303	316	310	1657	1607	1636	1651	1612	1633	22.63
342	348	345	1763	1748	1750	1740	1762	1753	21.88
340	345	343	1714	1702	1732	1707	1716	1714	21.35
301	330	316	1661	1683	1670	1655	1672	1668	20.66
333	338	336	1699	1668	1678	1680	1689	1683	20.49
332	320	326	1633	1626	1615	1640	1639	1631	20.38
318	306	312	1666	1645	1672	1648	1650	1656	20.33
329	350	340	1655	1630	1641	1620	1635	1638	20.20
371	384	378	1630	1647	1659	1629	1610	1635	19.27
333	321	327	1591	1578	1583	1566	1568	1577	18.60
300	319	310	1526	1555	1536	1542	1540	1540	18.56
328	331	330	1551	1529	1538	1520	1544	1536	18.44
310	321	316	1536	1549	1538	1546	1527	1539	18.14
333	370	352	1536	1547	1523	1570	1555	1546	18.13
327	329	328	1448	1430	1433	1441	1426	1436	17.43
346	352	349	1422	1440	1431	1411	1423	1427	16.59
321	340	331	1388	1396	1400	1397	1379	1392	15.67

ตาราง (ต่อ)

แบบกราวด์			จำนวนนับรังสี ต่อ 100 วินาที						เปอร์เซ็นต์ความ ขึ้นที่ได้จากการ คำนวณ (%)
จำนวนนับ/100 วินาที	เฉลี่ย		ครั้งที่ 1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
ครั้งที่ 1	2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
327	326	327	1400	1691	1402	1410	1395	1400	15.49
343	350	347	1400	1389	1393	1402	1401	1397	14.43
311	319	315	1396	1400	1402	1390	1394	1396	14.26
319	324	322	1440	1426	1435	1445	1420	1432	13.39
321	328	325	1388	1376	1359	1357	1366	1369	13.21
326	318	322	1359	1338	1349	1360	1321	1345	13.14
308	319	314	1338	1349	1328	1359	1330	1341	12.19
309	314	312	1320	1306	1311	1314	1301	1312	12.11
366	372	369	1298	1309	1311	1290	1304	1302	12.09
351	340	346	1223	1240	1266	1239	1245	1243	11.97
356	364	360	1129	1110	1112	1136	1140	1126	11.68
368	388	378	1138	1120	1111	1127	1130	1126	11.25
342	327	335	1119	1130	1106	1140	1127	1124	10.89
340	329	335	1150	1141	1129	1138	1148	1141	10.56
327	351	339	1120	1137	1108	1138	1125	1127	10.24
339	350	345	1111	1131	1120	1109	1126	1119	10.21
342	321	332	1112	1130	1111	1106	1120	1116	10.06
322	340	331	1075	1083	1066	1050	1061	1067	9.85
319	326	323	1086	1073	1071	1066	1055	1068	9.38
330	309	320	1035	1051	1053	1044	1036	1044	9.26
338	324	331	928	936	915	940	906	925	8.87
360	348	354	990	987	969	991	980	982	8.85
342	327	335	1011	1066	1009	1001	994	1004	8.72
361	355	358	1010	1017	1026	1039	1011	1021	8.26
328	314	321	950	925	936	915	944	934	8.23
372	368	370	930	927	954	946	918	935	7.89
334	340	337	880	890	878	865	876	879	7.89

ตาราง (ต่อ)

แบบกราวนด์			จำนวนนับรังสี ต่อ 100 วินาที						เปอร์เซ็นต์ความ ขึ้นที่ได้จากการ คำนวณ (%)
จำนวนนับ/100 ครั้งที่ 1	2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
341	348	345	890	873	888	899	902	890	7.49
322	334	328	860	839	851	845	870	835	7.43
329	336	333	865	881	850	871	859	865	7.04
332	335	334	839	845	850	826	835	839	6.91
354	360	357	826	833	815	819	823	821	6.67
320	311	316	811	821	833	823	816	821	6.43
337	324	331	811	823	831	820	808	819	6.32
318	328	323	811	824	806	815	820	814	6.25
333	340	337	844	822	836	811	805	824	6.22
322	328	325	742	737	726	740	722	733	5.99
329	339	334	757	747	733	740	750	746	5.78
350	330	340	740	731	720	729	719	729	5.56
366	353	360	736	741	729	731	718	729	5.53
315	327	321	744	708	722	714	740	726	5.46
318	314	316	736	720	711	729	740	727	5.37
333	336	335	744	729	739	718	730	729	5.35
319	331	325	729	730	745	718	732	731	5.14
319	328	324	711	700	703	695	706	703	5.06
308	325	317	610	604	615	613	608	610	4.49
341	360	351	631	629	618	620	635	625	4.28
330	317	324	606	598	601	594	600	600	4.26
326	316	321	621	635	611	606	620	619	4.21
340	350	345	510	505	500	504	501	504	3.92
338	321	330	502	506	500	510	519	509	3.90
330	327	329	448	456	470	455	461	458	3.39
350	338	344	498	502	500	496	490	496	3.34

ภาคผนวก ข

ตารางผลการทดลองการศึกษาความหนาวิกฤตและพื้นที่วิกฤตของดินลูกรัง

ผลการทดลองเพื่อหาความหนาวิกฤตและพื้นที่วิกฤตของดินลูกรัง ซึ่งได้จากการวัดจำนวนน้ำรังสีของตัวอย่างดินที่ทำขึ้นเป็น 3 ประเภทคือ ชนิดแห้ง ขึ้นปานกลาง และขึ้นมาก ซึ่งเสมือนตัวแทนของปริมาณความชื้นต่าง ๆ กัน จากระดับเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่ำจนความชื้นสูง ดังแสดงในตารางต่อไปนี้

ตารางจำนวนน้ำรังสีแต่ละรูปแบบของตัวอย่างดินลูกรังในกะบะ

รูปแบบกะบะ	ความสูง (ซม.)	จำนวนน้ำรังสี ต่อ 100 วินาที								
		ดินแห้ง			ดินขึ้นปานกลาง			ดินขึ้นมาก		
1	10	974	976	989	1314	1350	1333	1991	1982	1990
	12	1050	1022	1042	1361	1349	1364	2032	2048	2016
	14	1040	1066	1050	1449	1438	1429	2002	2032	2010
	16	1045	1053	1039	1514	1504	1509	2040	2048	2060
	18	1069	1040	1039	1511	1510	1519	2066	2040	2051
	20	1013	1035	1019	1500	1503	1510	2008	2015	2020
	22	1031	1053	1043	1511	1504	1501	2011	2013	2030
2	10	1019	1013	1031	1540	1531	1529	2003	2010	2006
	12	1070	1055	1066	1541	1521	1530	2018	2011	2007
	14	1032	1022	1045	1500	1508	1520	2040	2035	2056
	16	1063	1026	1040	1541	1523	1535	2096	2073	2066
	18	1029	1038	1011	1518	1544	1537	2078	2040	2030
	20	1046	1035	1050	1522	1515	1502	2046	2055	2078
	22	1033	1018	1008	1536	1529	1518	2088	2070	2035
3	10	1030	1049	1033	1341	1385	1333	2040	2055	2038
	12	1024	1045	1028	1386	1351	1348	2020	2035	2042

ตาราง (ต่อ)

รูปแบบ กะบะ	ความสูง (ซม.)	จำนวนเบร้งลี ต่อ 100 วินาที								
		ดินแห้ง			ดินชั้นปานกลาง			ดินชั้นมาก		
3	14	1061	1038	1022	1429	1447	1440	2221	2256	2276
	16	1045	1031	1011	1495	1417	1410	2253	2249	2262
	18	1019	1026	1008	1485	1491	1470	2270	2290	2250
	20	1018	1036	1020	1460	1446	1471	2288	2256	2270
	22	1032	1014	1019	1469	1450	1438	2250	2260	2264
4	10	1051	1042	1062	1329	1335	1321	2135	2136	2155
	12	1061	1047	1040	1440	1425	1405	2196	2148	2176
	14	1069	1077	1044	1433	1408	1435	2248	2260	2255
	16	1023	1028	1040	1506	1556	1523	2395	2378	2350
	18	1042	1027	1036	1646	1680	1659	2440	2435	2449
	20	1033	1046	1039	1657	1625	1640	2450	2459	2460
	22	1036	1051	1027	1638	1649	1611	2455	2438	2410
5	10	1036	1047	1019	1378	1365	1377	2066	2059	2019
	12	1066	1050	1029	1458	1483	1466	2078	2055	2038
	14	1051	1033	1020	1528	1510	1529	2248	2260	2239
	16	1019	1038	1026	1519	1526	1510	2550	2538	2536
	*18	1061	1039	1048	1539	1556	1540	2660	2670	2666
	20	1058	1024	1040	1577	1555	1569	2680	2648	2655
	22	1060	1048	1033	1515	1519	1528	2620	2638	2619
6	10	967	982	956	1646	1624	1659	2238	2244	2269
	12	969	941	975	1621	1635	1625	2248	2216	2207
	14	1011	1022	1035	1666	1622	1645	2238	2240	2218
	16	1028	1015	1009	1787	1791	1737	2540	2538	2566
	18	1016	1011	1031	1815	1834	1839	2672	2682	2650

ตาราง (ต่อ)

รูปแบบ กษณะ	ความสูง (ซม.)	จำนวนนับรังสี ต่อ 100 วินาที								
		ดินแห้ง			ดินชั้นปานกลาง			ดินชั้นมาก		
6	20	1011	1040	1028	1842	1823	1809	2666	2638	2645
	22	1026	1038	1040	1836	1851	1808	2635	2667	2655
A	10	1022	1040	1036	1466	1476	1481	2066	2048	2035
	12	1048	1026	1070	1441	1449	1462	2072	2096	2055
	14	1066	1043	1055	1522	1516	1539	2048	2033	2078
	16	1021	1011	1027	1534	1559	1541	2222	2248	2233
	18	1031	1033	1040	1539	1551	1569	2276	2286	2249
	20	1048	1050	1029	1530	1533	1522	2232	2239	2250
	22	1038	1013	1024	1529	1536	1554	2240	2230	2219
B	10	1068	1045	1056	1570	1561	1587	2026	2049	2053
	12	1062	1066	1053	1574	1581	1564	2066	2033	2019
	14	1062	1053	1066	1672	1682	1674	2222	2248	2266
	16	1027	1048	1053	1622	1616	1651	2248	2219	2215
	18	1033	1074	1045	1687	1655	1674	2236	2248	2206
	20	1046	1061	1073	1666	1629	1638	2229	2252	2238
	22	1055	1049	1029	1641	1659	1623	2250	2236	2240
C	10	976	980	927	1561	1582	1543	2148	2160	2155
	12	1072	1043	1055	1536	1538	1522	2200	2198	2176
	14	1042	1021	1052	1534	1526	1552	2228	2250	2243
	16	1040	1030	1024	1525	1539	1541	2533	2526	2556
	18	1020	1019	1008	1530	1548	1515	2661	2648	2635
	20	1026	1037	1062	1521	1526	1556	2626	2606	2640
	22	1011	1001	1030	1529	1555	1541	2625	2643	2649

ตาราง (ต่อ)

รูปแบบ กะบะ	ความสูง (ซม.)	จำนวนนับรังสี ต่อ 100 วินาที								
		ดินแห้ง			ดินชั้นปานกลาง			ดินชั้นมาก		
D	10	951	967	946	1629	1629	1611	2194	2167	2148
	12	991	982	950	1760	1787	1791	2627	2650	2641
	14	941	944	960	1865	1878	1880	2621	2633	2654
	16	953	936	966	1896	1855	1870	2640	2620	2635
	18	922	935	964	1819	1829	1836	2609	2623	2626
	20	939	951	955	1811	1850	1839	2646	2414	2632
	22	926	945	937	1825	1832	1842	2619	2637	2623
E	10	939	954	963	1435	1456	1415	2066	2089	2045
	12	979	982	958	1470	1445	1482	2047	2029	2040
	14	927	946	978	1426	1439	1418	2041	2031	2024
	16	942	923	949	1721	1734	1720	2060	2045	2029
	18	932	940	921	1872	1881	1842	2388	2363	2394
	20	953	949	973	1970	1943	1949	2345	2332	2350
	22	941	911	901	1936	1940	1954	2341	2326	2346
F	10	932	936	948	1350	1390	1377	2339	2317	2322
	12	968	933	925	1424	1411	1449	2510	2530	2502
	14	927	941	918	1703	1706	1740	2741	2711	2721
	16	927	941	918	1730	1753	1723	2722	2728	2745
	18	910	928	931	1818	1839	1850	2792	2780	2753
	20	940	933	916	1823	1835	1806	2766	2735	2755
	22	909	920	914	1843	1814	1849	2740	2726	2748



ภาคผนวก ค

ตารางผลการทดลองการสร้างกราฟเปรียบเทียบของตัวอย่างดินลูกรัง

ผลการทดลองการสร้างกราฟเปรียบเทียบของตัวอย่างดินลูกรัง ซึ่งแสดงข้อมูลระหว่าง เปอร์เซ็นต์ความชื้นในตัวอย่างดินลูกรังกับจำนวนนับรังสีเฉลี่ย และได้แสดงจำนวนนับรังสีของแผ่นมาตรฐานพาราฟินที่ใช้ตรวจสอบและปรับอุปกรณ์การวัดรังสีด้วย ข้อมูลทั้งหมดรวม 43 จุด จาก 3 ชุดด้วยกัน ดังตารางต่อไปนี้

ตารางข้อมูลของจำนวนนับรังสีเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นในตัวอย่างดินลูกรัง

แผ่นมาตรฐานพาราฟิน จำนวนนับ/ 400 วินาที				ตัวอย่างดินลูกรัง จำนวนนับ/ 400 วินาที				เปอร์เซ็นต์ความชื้น จากการคำนวณ (%)
ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย	
7048	7009	7023	7027	4065	4077	4049	4064	0.54
7111	7095	7138	7115	3825	3842	3810	3826	0.705
7140	7078	7120	7113	4278	4243	4256	4259	1.959
7080	7099	7106	7095	4085	4076	4040	4067	2.185
7120	7089	7111	7107	4662	4650	4639	4650	2.53
7030	7060	7081	7057	4444	4358	4396	4399	2.814
7080	7114	7088	7094	4677	4638	4660	4658	2.986
7116	7100	7079	7098	5160	5129	5113	5134	3.483
7095	7065	7039	7066	4950	4936	4915	4934	3.952
7088	7107	7077	7091	5088	5072	5100	5087	3.99
7040	7089	7051	7057	5076	5061	5088	5075	4.16
7126	7098	7109	7111	5110	5099	5055	5088	4.679
7106	7086	7045	7079	5324	5349	5338	5337	4.841
7088	7114	7076	7093	5341	5320	5304	5322	4.856
7066	7049	7053	7056	5557	5526	5538	5540	5.15
7120	7097	7114	7110	5460	5478	5422	5453	5.185
7055	7070	7061	7062	5699	5726	5731	5719	5.946

ตาราง (ต่อ)

แผ่นมาตรฐานพาราฟิน จำนวนนับ/ 400 วินาที				ตัวอย่างดินลูกรัง จำนวนนับ/ 400 วินาที				เปอร์เซ็นต์ความชื้น จากการคำนวณ (%)
ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	2	3	เฉลี่ย	
7043	7068	7060	7057	5466	5475	5496	5479	5.976
7080	7043	7071	7065	5646	5626	5610	5627	5.98
7130	7100	7114	7115	6193	6187	6225	6202	6.908
7099	7078	7056	7078	6066	6083	6077	6075	7.02
7085	7110	7119	7105	6048	6059	6033	6047	7.056
7106	7090	7100	7099	6015	5987	5986	5996	7.962
7033	7066	7051	7050	6442	6459	6461	6454	7.97
7128	7116	7086	7110	6450	6459	6444	6451	8.145
7066	7069	7077	7071	6811	6840	6815	6822	8.98
7085	7113	7116	7105	6710	6728	6741	6727	8.987
7040	7066	7081	7062	6534	6513	6489	6512	9.219
7051	7079	7043	7057	6940	6976	6973	6963	9.868
7125	7109	7113	7116	7022	7048	7059	7043	9.974
7044	7069	7060	7058	7134	7100	7111	7115	9.99
7090	7065	7102	7086	7420	7432	7416	7423	10.98
7066	7048	7100	7071	7388	7405	7395	7396	10.981
7115	7140	7095	7117	6996	7088	7048	7044	10.983
7099	7121	7088	7103	7535	7511	7574	7540	11.976
7123	7108	7085	7105	7643	7666	7628	7646	11.988
7076	7048	7053	7059	7768	7777	7758	7768	12.02
7102	7078	7125	7102	8320	8257	8296	8291	12.99
7069	7080	7050	7066	8111	8149	8168	8143	12.995
7043	7065	7077	7062	8216	8229	8200	8215	13.0
7100	7089	7068	7086	8642	8664	8658	8655	13.98
7095	7061	7110	7089	8663	8629	8640	8644	13.982
7115	7099	7126	7113	8589	8635	8600	8608	13.983

ภาคผนวก ง

การคำนวณหาขนาดของโปรบวัดความชื้นและภาชนะบรรจุโปรบวัดความชื้น

1. การคำนวณหาฟลักซ์จากที่ผิวของโปรบวัดความชื้นและส่วนล่างที่เป็นกำบังรังสีจากส่วนผสมของวัสดุกำบังรังสีของโปรบวัดความชื้น

วัสดุกำบังรังสีที่เลือกใช้ ประกอบด้วย

ก. พาราฟินผสมผงโบรคในอัตราส่วน 2:1 เพื่อกำบังรังสีนิวตรอนและลดพลังงานของนิวตรอนพลังงานสูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของหัววัดตั้งที่ได้ทำการทดลองในหัวข้อ 4.3.4

ข. แผ่นเหล็กหนา 1.2 มิลลิเมตร เพื่อกำบังรังสีทั้งแกมมาและรังสีนิวตรอนพลังงานต่ำ สมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ ประกอบด้วย

ก. สมการการหาฟลักซ์ของนิวตรอน (18,19)

$$\text{FLUX}(\phi) = \frac{S}{4Tr^2} \exp.(-\Sigma_r t) \quad (1)$$

โดยที่ S = ยิลด์หรือความเข้มของนิวตรอน (yield or source strength)
มีหน่วย นิวตรอนต่อวินาที

Σ_r = macroscopic removal cross section
มีหน่วย ต่อเซนติเมตร (ชม.⁻¹)

t = ความหนาของวัสดุกำบังรังสี มีหน่วย เซนติเมตร

r = ระยะทางที่ต้องการหาฟลักซ์ของนิวตรอน มีหน่วย เซนติเมตร

ข. สมการการหา macroscopic removal cross section (หัวข้อ 2.4)

$$\Sigma_{r1} = N_1 \sigma_{r1} + N_2 \sigma_{r2} + \dots + N_n \sigma_{rn} \quad (2)$$

โดยที่ N_1 = จำนวนอะตอมของธาตุที่ต้องการ มีหน่วย อะตอมต่อเซนติเมตร³

σ_{r1} = macroscopic removal cross section มีหน่วย บาร์นต่ออะตอม

ค. สมการการหาจำนวนอะตอม (6)

$$N_1 = \frac{d_1 N_u}{M_1} \quad (9)$$

โดยที่ d_1 = ความหนาแน่นของธาตุที่ต้องการ มีหน่วย กรัมต่อเซนติเมตร³
 N_u = Avogadro's number มีค่าเท่ากับ 6.022×10^{23} อะตอม (6)
 M_1 = น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) ของธาตุที่ต้องการ มีหน่วย กรัม

1.1 macroscopic removal cross section รวมของวัสดุที่ใช้เป็นตัวกำบังรังสี

1.1.1 การหาความหนาแน่นรวมของพาราฟินผสมผงโบริด

สมการการหาความหนาแน่นรวม คือ (20)

$$\frac{1}{d} = \frac{w_1}{d_1} + \frac{w_2}{d_2}$$

โดยที่ w_1, w_2 = อัตราส่วนของของผสมระหว่างพาราฟินกับผงกรดโบริด
 d_1, d_2 = ความหนาแน่นของพาราฟินและผงกรดโบริด ตามลำดับ
 = 0.903 กรัมต่อเซนติเมตร³ และ 1.495 กรัมต่อเซนติเมตร³

แทนค่าในสมการการหาความหนาแน่นรวมได้ดังนี้

$$\frac{1}{d} = \frac{0.667}{0.903} + \frac{0.333}{1.435}$$

$$d = 1.03 \text{ กรัมต่อเซนติเมตร}^3$$

1.1.2 การหาจำนวนอะตอมรวมของพาราฟินผสมผงกรดโบริด

สูตรโมเลกุลของพาราฟิน เป็น $C_{56}H_{114}$ --- $C_{50}H_{114}$ โดยเลือกสูตรที่ใช้
 คำนวณเป็น $C_{56}H_{114}$ ดังนั้นน้ำหนักโมเลกุลของพาราฟิน เป็น

$$M_{\text{paraffin}} = (56 \times 12) + (114 \times 1) = 786 \text{ กรัม}$$

สูตรโมเลกุลของผงกรดโบริด เป็น $B_2O_3 \cdot 3H_2O$

ดังนั้นน้ำหนักโมเลกุลของผงกรดโบริด เป็น

$$M_{\text{boric acid}} = (2 \times 10) + (3 \times 16) + 3[(2 \times 1) + (1 \times 16)] = 122 \text{ กรัม}$$

$$\text{ดังนั้นน้ำหนักโมเลกุลผสม} = 786 + 122 = 908 \text{ กรัม}$$

แทนค่าลงในสมการ (3) จะได้จำนวนอะตอมรวมของพาราฟินผสมผงกรดโบริด ดังนี้

$$N_{\text{total}} = \frac{1.03 \times 6.02217 \times 10^{23}}{908}$$

$$= 6.8313 \times 10^{20} \text{ อะตอม}$$

1.1.3 การหา macroscopic removal cross section รวมของพาราฟินผสมผงกรดโบรிக

จากสมการ (2) จะหาจำนวนอะตอมของธาตุที่ต้องการ (N_i) ได้ดังนี้ จากพาราฟินจะได้

$$\text{จำนวนอะตอมของไฮโดรเจน } (N_H) = \frac{66.7(114 \times 6.8313 \times 10^{20})}{100}$$

$$= 5.1944 \times 10^{22} \text{ อะตอม}$$

$$\text{จำนวนอะตอมของคาร์บอน } (N_C) = \frac{66.7(56 \times 6.8313 \times 10^{20})}{100}$$

$$= 2.5516 \times 10^{22} \text{ อะตอม}$$

จากผงกรดโบริก จะได้

$$\text{จำนวนอะตอมของโบรอน } (N_B) = \frac{33.3(2 \times 6.8313 \times 10^{20})}{100}$$

$$= 4.5496 \times 10^{20} \text{ อะตอม}$$

$$\text{จำนวนอะตอมของออกซิเจน } (N_O) = \frac{33.3[(3 + (3 \times 1))] \times 6.8313 \times 10^{20}}{100}$$

$$= 1.3649 \times 10^{21} \text{ อะตอม}$$

$$\text{จำนวนอะตอมของไฮโดรเจน } (N_H) = \frac{33.3[(3 \times 2) \times 6.8313 \times 10^{20}]}{100}$$

$$= 1.3649 \times 10^{21} \text{ อะตอม}$$

แทนค่าในสมการ(2) จะได้ macroscopic removal cross section รวมของพาราฟินผสมผงกรดโบริก

$$\Sigma_{r(\text{mixed})} = N_H \sigma_{rH} + N_C \sigma_{rC} + N_B \sigma_{rB} + N_O \sigma_{rO} + N_H \sigma_{rH}$$

$$= (5.1944 \times 10^{22} \times 1.0 \times 10^{-24}) + (2.5516 \times 10^{22} \times 0.81 \times 10^{-24}) +$$

$$(4.5496 \times 10^{20} \times 0.97 \times 10^{-24}) + (1.3649 \times 10^{21} \times 1.0 \times 10^{-24}) +$$

$$(1.3649 \times 10^{21} \times 1.0 \times 10^{-24})$$

$$= 0.075783 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$$

หมายเหตุ ค่า macroscopic removal cross section ของไฮโดรเจน, คาร์บอน, โบรอน และออกซิเจน มีค่าเป็น 1.0, 0.81, 0.97, 1.0 บาร์นต่ออะตอม ตามลำดับ(17,20)

1.1.4 การหา macroscopic removal cross section รวมของวัสดุกำบังรังสี
สมการการหา macroscopic removal cross section รวม ดังนี้

$$\Sigma_{r(\text{total})} = w_{(\text{mixed})} \Sigma_{r(\text{mixed})} + w_{Fm} \Sigma_{rFm}$$

$$\Sigma_{r(\text{total})} = 0.075783 w_{(\text{mixed})} + 0.17 w_{Fm} \quad (4)$$

โดยที่ Σ_{rFm} = macroscopic removal cross section ของเหล็ก
มีค่าเท่ากับ 0.17 เซนติเมตร⁻¹ (17)

w_1 = อัตราส่วนผสมของวัสดุกำบังรังสีที่ต้องการต่อส่วนผสมทั้งหมด

1.2 การหาพื้นที่ผิวของส่วนผสมของวัสดุกำบังรังสีของโปรบวัดความชื้น

ด้วยเหตุผล 2 ประการดังต่อไปนี้ คือ

- ก. เพื่อสะดวกต่อการใช้งานภาคสนาม ทั้งลักษณะและน้ำหนักของโปรบวัดความชื้น
- ข. ขนาดของหัววัดรังสีนิวตรอนพลังงานต่ำ (BF_3) ซึ่งยาวประมาณ 26.5 เซนติเมตร เฉพาะส่วนที่ไวต่อรังสี หรือยาวทั้งหมด 30 เซนติเมตร จึงทำให้การออกแบบได้ดังนี้ คือ (ดังแสดงในรูป 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ)

ก. ส่วนของโปรบวัดความชื้น (เฉพาะส่วนของหัววัดรังสีและต้นกำเนิดรังสี) มีรายละเอียด คือ ขนาดกว้าง 13 เซนติเมตร ยาว 37 เซนติเมตร สูง(หนา) 8 เซนติเมตร

ข. ส่วนล่างซึ่งเป็นส่วนกำบังรังสี มีรายละเอียด คือ ขนาดกว้าง 13 เซนติเมตร ยาว 37 เซนติเมตร สูง(หนา) 6 เซนติเมตร

1.2.1 การหาพื้นที่ผิวของส่วนโปรบวัดความชื้น ที่ประกอบด้วยหัววัดรังสี และต้นกำเนิดรังสี

ปริมาตรของโปรบวัดความชื้นทั้งหมด = $13 \times 37 \times 8 = 3848$ เซนติเมตร³

น้ำหนักของพาราฟินผสมผงกรดโบริก = $3848 \times 0.975 = 3.752$ กิโลกรัม

ปริมาตรของแผ่นเหล็กหนา 0.12 ซม. หุ้มภายนอก = $2(8 \times 37 \times 0.12) + (13 \times 37 \times 0.12) + 2(8 \times 13 \times 0.12)$
= 153.72 เซนติเมตร³

น้ำหนักของแผ่นเหล็ก = $153.72 \times 7.327 = 1.126$ กิโลกรัม

น้ำหนักรวม = $3.752 + 1.126 = 4.878$ กิโลกรัม

แทนค่าในสมการ (4) จะได้

$$\begin{aligned}\Sigma_{r(\text{total})} &= 0.075783 \left(\frac{3.752}{4.878} \right) + 0.17 \left(\frac{1.126}{4.878} \right) \\ &= 0.09753 \text{ เซนติเมตร}^{-1}\end{aligned}$$

ดังนั้นแทนค่าในสมการ (1) โดยกำหนดให้

$\Sigma_{r(\text{total})} = 0.09753 \text{ ซม.}^{-1}$, $t = r =$ ที่ผิวของโปรบวัดความชื้น = 8 ซม. และ $S = 6.6 \times 10^4$ นิวตรอนต่อวินาที (กำหนดจากแหล่งที่ผลิตต้นกำเนิดรังสี) จะได้

$$\text{FLUX } (\phi) = \frac{6.6 \times 10^4 \exp(-0.09753 \times 8)}{4\pi(8^2)}$$

$$\text{FLUX } (\phi)_{\text{uu}} = 37.6097 \text{ นิวตรอน/เซนติเมตร}^2 \cdot \text{วินาที}$$

1.2.2 การหาฟลักซ์ที่ผิวของส่วนล่างที่เป็นส่วนกำบังรังสี

ปริมาตรของส่วนล่างทั้งหมด = $13 \times 37 \times 6 = 2886$ เซนติเมตร³

น้ำหนักของพาราฟินผสมผงกรดโบรค = $2886 \times 0.975 = 2.814$ กิโลกรัม

ปริมาตรของแผ่นเหล็กหนา 0.12 ซม. หุ้มภายนอก = $2(6 \times 37 \times 0.12) +$
 $(13 \times 37 \times 0.12) + 2(6 \times 13 \times 0.12)$
 $= 129.72$ เซนติเมตร³

น้ำหนักของแผ่นเหล็ก = $129.72 \times 7.327 = 0.951$ กิโลกรัม

น้ำหนักรวม = $2.814 + 0.951 = 3.765$ กิโลกรัม

แทนค่าในสมการ (4) จะได้

$$\begin{aligned}\Sigma_{r(\text{total})} &= 0.075783 \left(\frac{2.814}{3.765} \right) + 0.17 \left(\frac{0.951}{3.765} \right) \\ &= 0.09958 \text{ เซนติเมตร}^{-1}\end{aligned}$$

ดังนั้นแทนค่าในสมการ (1) โดยกำหนดให้

$\Sigma_{r(\text{total})} = 0.09958 \text{ ซม.}^{-1}$, $t = r = 6$ ซม.
 และ $S = 6.6 \times 10^4$ นิวตรอนต่อวินาที (กำหนดจากแหล่งที่ผลิตต้นกำเนิดรังสี) จะได้

$$\text{FLUX } (\phi) = \frac{6.6 \times 10^4 \exp(-0.09958 \times 6)}{4\pi(6^2)}$$

$$\text{FLUX } (\phi)_{\text{ห่าง}} = 80.2693 \text{ นิวตรอน/เซนติเมตร}^2 \cdot \text{วินาที}$$

2. การคำนวณหาปริมาณรังสีที่ผิวของโพรบวัดความชื้นและส่วนล่างของส่วนกำบังรังสี

พบว่าต้นกำเนิดรังสีแบบอเมอริเซียม-เบอริลเลียม ขนาดความแรง 100 มิลลิวินาที (3.7 จิกะ-เบคเคอเรล) ที่ระยะ 1 ซม. จะมีฟลักซ์ของนิวตรอนเป็น 20000 นิวตรอน/เซนติเมตร²·วินาที มีอัตราของปริมาณรังสีนิวตรอนเทียบเท่า (neutron dose equivalent rate) เป็น 2800 มิลลิเรมต่อชั่วโมง และมีอัตราของปริมาณรังสีแกมมาเทียบเท่า (gamma dose equivalent rate) เป็น 2500 มิลลิเรมต่อชั่วโมง (21) เมื่อคำนวณเทียบกลับเป็นปริมาณความแรงของต้นกำเนิดที่ใช้เพียง 30 มิลลิวินาที (1.11 จิกะ-เบคเคอเรล) จะได้ฟลักซ์ของนิวตรอนเป็น 6000 นิวตรอน/เซนติเมตร²·วินาที มีอัตราของปริมาณรังสีนิวตรอนเทียบเท่าเป็น 840 มิลลิเรมต่อชั่วโมงและมีอัตราของปริมาณรังสีแกมมาเทียบเท่าเป็น 2750 มิลลิเรมต่อชั่วโมง ที่ระยะ 1 ซม. เช่นกัน โดยวิธีบัญญัติไตรยางค์ทางเลขคณิต (rule of three in arithmetic)

โดยวิธีกฎกำลังสองผกผัน (inverse square law) ที่ระยะต่างๆ จะมีการลดลงของปริมาณรังสีเป็นไปตามสัดส่วนของกฎดังกล่าว ดังนั้นการแปลงปริมาณรังสีดังกล่าวจากที่ระยะ 1 ซม. เป็น 8 ซม. และ 6 ซม. (ที่ผิวด้านบนและล่างตามลำดับ) จะได้ปริมาณรังสีใหม่ที่ระยะ 8 และ 6 ซม. ดังตัวอย่างการคำนวณดังนี้

ที่ระยะ 8 ซม.

ระยะ 1 เซนติเมตร	ฟลักซ์ของนิวตรอนมีค่า	6000	นิวตรอน/ซม. ² ·วินาที
" 8 "	" "	$6000/8^2 = 93.75$	" "

จากการคำนวณในลักษณะดังกล่าวก็จะได้ ค่าปริมาณรังสีต่างๆใหม่ดังนี้
ที่ระยะ 8 ซม.

ฟลักซ์นิวตรอนมีค่า 93.75 นิวตรอน/ซม.²·วินาที อัตราปริมาณรังสีนิวตรอนเทียบเท่าเป็น 13.125 มิลลิเรมต่อชั่วโมง และอัตราปริมาณรังสีแกมมาเทียบเท่าเป็น 11.719 มิลลิเรมต่อชั่วโมง ที่ระยะ 6 ซม.

ฟลักซ์นิวตรอนมีค่า 166.667 นิวตรอน/ซม.²·วินาที อัตราปริมาณรังสีนิวตรอนเทียบเท่าเป็น 23.333 มิลลิเรมต่อชั่วโมง และอัตราปริมาณรังสีแกมมาเทียบเท่าเป็น 20.833 มิลลิเรมต่อชั่วโมง

2.1 การคำนวณหาปริมาณรังสีที่ผิวของโพรบวัดความชื้น

โดยการเทียบบัญญัติไตรยางค์ทางเลขคณิต สามารถคำนวณหาปริมาณรังสีที่ผิวด้านบนของหัววัดดังนี้ จากผลการคำนวณฟลักซ์ของนิวตรอนที่ผิวด้านบน ในหัวข้อ 1.2.1 มีค่าเป็น 37.6097 นิวตรอน/ซม.²·วินาที การคำนวณหาปริมาณรังสีที่ผิวด้านบน จึงเป็น

ฟลักซ์นิวตรอนมีค่า 93.75 นิวตรอน/ซม.².วินาที จะมีอัตราปริมาณรังสีนิวตรอนเทียบเท่า เป็น 13.125 มิลลิเรมต่อชั่วโมง ถ้าฟลักซ์นิวตรอนมีค่า 37.6097 นิวตรอน/ซม.².วินาที จะมีอัตราปริมาณรังสีนิวตรอนเทียบเท่า เป็น $13.125 \times 37.6097 / 93.75 = 5.265$ มิลลิเรมต่อชั่วโมง

โดยอาศัยวิธีการคำนวณเทียบกับปริมาณรังสีของฟลักซ์นิวตรอนดังกล่าว ก็จะได้อัตราปริมาณรังสีแกมมาเทียบเท่า เป็น 4.701 มิลลิเรมต่อชั่วโมง เช่นกัน

ผลรวมของปริมาณรังสีทั้งสอง เท่ากับ 9.966 มิลลิเรมต่อชั่วโมง

2.2 การคำนวณหาปริมาณรังสีที่ผิวด้านล่าง (ส่วนของกำบังรังสี)

โดยหลักการเช่นเดียวกับการคำนวณในหัวข้อ 2.1 นั้นเอง แต่ฟลักซ์นิวตรอนที่เทียบค่าได้ เปลี่ยนเป็น 80.2693 นิวตรอน/ซม.².วินาที ดังการคำนวณในหัวข้อ 1.2.2

ดังนั้นอัตราปริมาณรังสีนิวตรอนเทียบเท่า เป็น 11.238 มิลลิเรมต่อชั่วโมง และอัตราปริมาณรังสีแกมมาเทียบเท่า เป็น 10.039 มิลลิเรมต่อชั่วโมง

ผลรวมของปริมาณรังสีทั้งสอง เท่ากับ 21.271 มิลลิเรมต่อชั่วโมง

3. การคำนวณหาปริมาณรังสีที่ผิวด้านบนและด้านล่างภาชนะบรรจุโปรบวัดความชื้น

ด้วยเหตุผล 2 ประการต่อไปนี้

ก. เพื่อเป็นกำบังรังสีในการนำโปรบวัดความชื้นออกไปวัดนอกสถานที่ และใช้เป็นภาชนะบรรจุโปรบวัดความชื้นด้วย

ข. เพื่อสะดวกต่อการเคลื่อนย้ายและน้ำหนักไม่มากต่อการขนย้าย

การออกแบบจึงเป็นไปดังแสดงในรูป 5.12 และ 5.13 ตามลำดับ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

ก. ส่วนบนหรือฝา ขนาดกว้าง 24 เซนติเมตร ยาว 48 เซนติเมตร และสูง 5 เซนติเมตร

ข. ส่วนลำตัวแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

- ภายนอก ขนาดกว้าง 24 เซนติเมตร ยาว 48 เซนติเมตร และสูง 24 เซนติเมตร

- ภายในซึ่งเป็นช่องสี่เหลี่ยมเพื่อบรรจุโปรบวัดความชื้น ขนาดกว้าง 14 เซนติเมตร ยาว 37

เซนติเมตร และสูง 14 เซนติเมตร

วัสดุที่ใช้ประกอบด้วย แผ่นอลูมิเนียมขนาดหนา 1.2 มิลลิเมตร (เพื่อให้ตัวภาชนะมีน้ำหนักเบา) และพาราฟินผสมผงกรดโบริกเพื่อกำบังรังสีนิวตรอน โดยใช้แผ่นอลูมิเนียมบุทั้งภายนอกและในตัวภาชนะทั้งหมด

3.1 ปริมาณรังสีที่ผิวด้านบน(ฝา)ของภาชนะ(เมื่อปิดฝา)

การคำนวณเป็นไปเช่นเดียวกับหัวข้อ 1 และ 2 ทั้งหมด แต่การคำนวณหา macroscopic removal cross section จะต้องเพิ่มดังนี้

$$\Sigma_{r(\text{total})} = 0.075783 w_{(\text{mixed})} + 0.17w_{Fm} + 0.079w_{A1} + 0.075783w_{(\text{mixed})} + 0.079 w_{A1}$$

โดยที่ $\Sigma_{r A1}$ = macroscopic removal cross section ของอลูมิเนียมมีค่า 0.079 เซนติเมตร⁻¹

โดยที่รังสีจะต้องผ่านชั้นของวัสดุ ดังนี้ คือ

ก. ตัวโปรบวัดความชื้น ซึ่งมีพาราฟินผสมผงกรดโบริค แผ่นเหล็ก

ข. ตัวภาชนะซึ่งมี แผ่นอลูมิเนียม พาราฟินผสมผงกรดโบริค และแผ่นเหล็ก

ดังนั้นการคำนวณหา macroscopic removal cross section จึงมีลักษณะการคำนวณดังที่แสดงผลการคำนวณปรากฏว่า อัตราปริมาณรังสีนิวตรอนเทียบเท่า มีค่า 1.461 มิลลิเรมต่อชั่วโมง และอัตราปริมาณรังสีแกมมาเทียบเท่าเป็น 1.305 มิลลิเรมต่อชั่วโมง ผลรวมของปริมาณรังสีทั้งสองเท่ากับ 2.766 มิลลิเรมต่อชั่วโมง

3.2 ปริมาณรังสีที่ผิวหนังข้าง

ผลการคำนวณในลักษณะเดียวกับหัวข้อ 3.1 อัตราปริมาณรังสีนิวตรอนเทียบเท่า มีค่า 1.989 มิลลิเรมต่อชั่วโมง และอัตราปริมาณรังสีแกมมาเทียบเท่าเป็น 1.775 มิลลิเรมต่อชั่วโมง ผลรวมของปริมาณรังสีทั้งสองเท่ากับ 3.764 มิลลิเรมต่อชั่วโมง



ข้อกำหนดมาตรฐาน
ของ
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
สำหรับ
อิฐดินเผา (อิฐมอญ)

นิยาม

1. อิฐดินเผา (หรือที่เรียกว่าอิฐมอญ) คืออิฐที่ทำจากดินเหนียวผสมกับแกลบหรือวัสดุอื่นขนาดเล็ทำให้เข้าเนื้อดีแล้วใส่พิมพ์ตัดทำเป็นแผ่น และเอาเข้าเตาเผาจนสุก
วัตถุประสงค์

2. เพื่อกำหนดขนาดและคุณภาพของอิฐดินเผา

ขนาด

3. แผ่นอิฐจะต้องมีขนาดยาว 2.00 เซนติเมตร กว้าง 9.5 เซนติเมตร หนา 5.0 เซนติเมตร

ความคลาดเคลื่อนของขนาด

4. ขนาดของแผ่นอิฐยอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกินกำหนด

ด้านยาว	—	5 มิลลิเมตร
ด้านกว้าง	—	3 มิลลิเมตร
ด้านหนา	—	3 มิลลิเมตร

การตรวจสอบขนาด

5. ให้มีการตรวจสอบขนาดของแผ่นอิฐ 1 ครั้ง ทุกจำนวนอิฐสองพันแผ่น ตัวอย่างอิฐที่นำมาตรวจให้หยิบจากกองอิฐ โดยไม่มีการคัดเลือกครั้งละ 10 แผ่น

- ก. เมื่อเรียงอิฐต่อกันเพื่อความยาวแล้ว จะต้องอยู่ระหว่าง 195 กับ 205 เซนติเมตร
- ข. เมื่อเรียงอิฐต่อกันเพื่อความกว้างแล้วจะต้องอยู่ระหว่าง 92 กับ 98 เซนติเมตร
- ค. เมื่อซ้อนกันเพื่อวัดความหนาแล้วจะต้องอยู่ระหว่าง 47 กับ 53 เซนติเมตร

ความแกร่ง (ความแข็ง)

6. แผ่นอิฐจะต้องเผาสุกดี และเป็นอิฐที่แกร่ง

การทดสอบความแกร่งของอิฐ

7. ทุกจำนวนอิฐสองพันแผ่นให้หยิบจากส่วนต่างๆ ของกองมา 20 แผ่น โดยไม่มีการคัดเลือก ให้วางแผ่นอิฐลงบนแผ่นเหล็กแบบซึ่งอยู่ในระดับนอน แล้วใช้แกนเหล็ก ซึ่งมีลูกปืนเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร เชื่อมติดปลาย วางบนแผ่นอิฐให้แกนอยู่ในแนวยืน น้ำหนักแกนเหล็กรวมทั้งลูกปืนเท่ากับ 10 กิโลกรัม ให้น้ำหนักกดอยู่บนอิฐ 1 นาที แล้วจึงยกแกนเหล็กออก ถ้าไม่ปรากฏเป็นรอยบนแผ่นอิฐหรือเป็นเพียงเล็กน้อยลูบบาง ๆ ด้วยนิ้วมือก็ลบหาย ให้ถือว่าอิฐแกร่งใช้ได้ ใน 20 แผ่นอนุญาตให้มีอิฐที่ไม่แกร่งตามการทดสอบข้างบนนี้ ได้ไม่เกิน 4 แผ่น

การต้านทานแรงอัด

8. อิฐจะต้องต้านทานแรงอัดสูงสุดได้ ไม่น้อยกว่า 20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

การทดสอบความต้านทานแรงอัด

9. ให้หยิบเอาอิฐมา 15 แผ่น โดยไม่มีการคัดเลือก การทดสอบให้ทำ 3 ครั้ง ๆ ละ 5 แผ่น แล้วเอาผลเฉลี่ยเป็นเกณฑ์ อิฐที่จะใช้สอบนี้ให้ชุบน้ำเสียก่อน ผสมปูนปลาสเตอร์กับน้ำให้เหลวพอสมควร นำไปละเลงบนแผ่นกระจกเรียบซึ่งวางอยู่ในระดับนอน ให้มีความหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร เอาอิฐแผ่นที่ 1 กดลงบนปูนปลาสเตอร์ให้ได้ระดับนอนพอประมาณแล้วตัดปูนปลาสเตอร์ที่สี่มุมขอบอิฐออกโดยรอบ เอาปูนปลาสเตอร์

ละเลงลงบนอิฐแผ่นนี้หนาประมาณเท่ากัน แล้วเอาอิฐแผ่นที่สองกดทับลงไปให้ ได้ระดับ นอนเช่นกัน และไม่ให้หล่นกันโดยทางใดทางหนึ่ง แล้วตัดปูนปลาสเตอร์ที่ล้นแผ่นออก ทำต่อไปเช่นนี้จนครบ 5 แผ่น แล้วทิ้งไว้ 5 นาที ละเลงปูนปลาสเตอร์บนแผ่นกระຈก เรียบคังข้างบนนี้อีกแผ่นหนึ่ง แล้วยกอิฐที่ติดกันด้วยปูนปลาสเตอร์แล้วทิ้ง 5 แผ่นนี้ออกจาก แผ่นกระຈก โดยระมัดระวังและพลิกกลับให้แผ่นที่ 5 วางกดลงบนปลาสเตอร์บนกระຈก แผ่นที่สองนี้ให้ผิวปลาสเตอร์ข้างบนขนานกับแผ่นกระຈก เสร็จแล้วทิ้งไว้สามชั่วโมงจึงนำเข้า เครื่องทดสอบความแข็งแรงอัดทางคานแบนของแผ่นอิฐ โดยใช้อัตราการเพิ่มแรงอัด 20 กิโลกรัม ต่อตารางเซนติเมตรในเวลา 1 นาที

ให้ถือว่าอิฐใช้ได้ ถ้าผลเฉลี่ยของการคานทานแรงอัดได้ ไม่น้อยกว่า 20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

การรอน้ำ (ความคืดกลืน)

10. อิฐจะต้องมีการรอน้ำไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์

การทดสอบการรอน้ำ

11. ทุก ๆ อิฐสองพันแผ่นให้หีบอิฐมา 5 แผ่น โดยไม่มีการคัดเลือกนำอิฐ ผิงไฟจนน้ำหนักที่ชั่งได้ 2 ครั้ง ห่างกัน 15 นาที ไม่เปลี่ยนแปลงเกิน 1 กรัม ทำเครื่องหมายที่แผ่นอิฐและจดน้ำหนักของแผ่นอิฐไว้ทุก ๆ แผ่น เอาอิฐแช่ลงในน้ำใสให้ท่วมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วยกออกเช็ดน้ำตามผิวให้แห้ง และนำไปชั่งใหม่ให้เสร็จภายใน 5 นาที หลังจากการยกออกจากรน้ำ จดน้ำหนักไว้

$$\text{การรอน้ำเป็นเปอร์เซ็นต์} = \frac{100 (n_2 - n_1)}{n_1}$$

n_1 = น้ำหนักอิฐที่ผิงไฟแล้ว

n_2 = น้ำหนักอิฐที่แช่น้ำแล้วควบ 24 ชั่วโมง

หาผลเฉลี่ยของการรอน้ำของอิฐทั้ง 5 แผ่น ให้ถือว่าอิฐใช้ได้

ถ้าผลเฉลี่ยไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์



Designation: D 3017 - 72

American National Standard A37.184-1972
Approved July 28, 1972
By American National Standards Institute

Standard Method of Test for MOISTURE CONTENT OF SOIL AND SOIL-AGGREGATE IN PLACE BY NUCLEAR METHODS (SHALLOW DEPTH)

This Standard is issued under the fixed designation D 3017; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal.

INTRODUCTION

This method covers determination of the moisture content of soil and soil-aggregate in place through the use of nuclear equipment. The equipment is calibrated to determine moisture content, as weight of water per unit volume of material (pounds per cubic foot or kilograms per cubic meter). Moisture content as normally used is defined as the ratio, expressed as a percentage, of the weight of water in a given soil mass to the weight of solid particles. It is determined with this procedure by dividing the moisture content (pounds per cubic foot or kilograms per cubic meter) by the dry unit weight of the soil (pounds per cubic foot or kilograms per cubic meter). Therefore, computation of moisture content using the nuclear equipment also requires the determination of the dry unit weight of the material under test. Most available nuclear equipment has provision for measuring both moisture content (pounds per cubic foot or kilograms per cubic meter) and wet unit weight. The difference between these two measurements gives dry unit weight.

The moisture content determined by this method is not necessarily the average moisture within the volume of sample involved in the measurement for reasons discussed in the Appendix. The principles of this method as well as the advantages and limitations are also discussed in the Appendix.

The equipment utilizes radioactive materials which may be hazardous to the health of the users unless proper precautions are taken.

1. Scope

1.1 This method covers determination of the moisture content of soil and soil-aggregate in place by moderation or slowing of fast neutrons where the neutron source and the thermal neutron detector both remain at the surface.

2. Applicable Documents

2.1 *ASTM Standards:*

D 1556 Test for Density of Soil in Place by the Sand-Cone Method¹

D 2167 Test for Density of Soil in Place by the Rubber-Balloon Method¹

D 2216 Laboratory Determination of Moisture Content of Soil²

¹ This method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-18 on Soil and Rock for Engineering Purposes. Current edition approved Feb. 4, 1972. Published February 1972.

² Annual Book of ASTM Standards, Part 19.

D 3017

3. Summary of Method

3.1 The moisture content of the material under test is determined by placing a fast neutron source and a thermal neutron detector on or adjacent to the material under test. The intensity of slow or moderated neutrons detected is dependent upon the moisture content of the material under test. Moisture is determined by the relationship of nuclear count to weight of water per unit volume of soil.

4. Significance

4.1 The method described is useful as a rapid, nondestructive technique for the in-place determination of moisture content of soil and soil-aggregate. The fundamental assumptions inherent in the method are that the hydrogen present is in the form of water as defined by Method D 2216, and that the material under test is homogeneous.

4.2 The method is suitable for control and acceptance testing of soils and soil-aggregate for construction, research, and development. Test results may be affected by chemical composition, sample heterogeneity, and, to a lesser degree, material density and the surface texture of the material being tested. The technique also exhibits spatial bias in that the apparatus is more sensitive to certain regions of the material under test.

5. Apparatus

5.1 *Fast Neutron Source*—A sealed isotope material such as americium-beryllium, radium-beryllium, or an electronic device such as a neutron generator.

5.2 *Slow Neutron Detector*—Any type of slow neutron detector such as boron trifluoride, a scintillator crystal, or a fission chamber.

5.3 *Readout Device*—A suitable scaler. Usually the readout device will contain the high-voltage supply necessary to operate the detector, and low-voltage power supply to operate the readout and accessory devices.

5.4 *Housing*—The source, detector, readout device, and power supply shall be in housings of rugged construction which shall be moistureproof and dustproof.

NOTE 1—The neutron source, detector, readout device, and power supply may be housed separately or may be combined and integrated with a nuclear density measuring system.

5.5 *Reference Standard*—for checking equipment operation and background count, and to establish conditions for a reproducible count rate.

5.6 *Site Preparation Device*—A steel plate, straightedge, or other suitable leveling tools may be used to plane the test site to the required smoothness.

6. Calibration

6.1 Calibration curves are established by determining by test the nuclear count rate (or count ratio) versus each known moisture content and placing a curve through the resulting points. The method and test procedure used in establishing the curve must be the same as used for determining moisture content of the material to be tested. The moisture content of materials used to establish the calibration curve must vary through a range to include the moisture content of materials to be tested. The materials used for calibration must be of uniform density as well as uniform moisture content.

NOTE 2—Due to the effect of chemical composition, some calibration curves supplied with the apparatus may not be applicable to all materials under test. Therefore, calibration curves must be checked, and adjusted if necessary, in accordance with 6.2 and 6.3.

6.1.1 Calibration curves can be established using the following methods:

6.1.1.1 Prepared containers of compacted soil and soil-aggregate of known moisture content. Prepared containers must be large enough to not change the observed count rate (or count ratio) if made larger in any dimension (Note 3). If the hydrogen density of a material can be calculated from its specific gravity, and chemical formula, provided these are accurately known, a much more reliable calibration point can be obtained in comparison to oven drying methods.

6.1.1.2 Volume determined by the sand cone (Method D 1556) or rubber ballon (Method D 2167) and weight of water by oven drying in conjunction with field compaction projects.

NOTE 3—Dimensions of approximately 24 in. long by 18 in. wide by 18 in. deep (approximately 610 by 457 by 457 mm) have proven satisfactory for equipment now available (1971).

D 3017

6.2 *Checking Calibration Curves*—The calibration curves for newly acquired instruments and repaired instruments should be checked. Calibration curves should be checked prior to tests in materials that are distinctly different from material types previously used in obtaining the calibration curves. Calibration curves may be checked using the procedures given in 6.1.1:

6.3 *Adjusting Calibration Curves*—When prepared containers of material of known moisture are being used to check the calibration, plot the count rate (or count ratio) versus each known moisture content as described in 6.1. If the points do not fall in a random manner on each side of the previously established calibration curve, replace the original calibration curve with a curve through the plotted check points.

6.3.1 If the moisture content of each of the comparison tests determined by any of the above calibration methods is random about the previously established calibration curve and the average deviation does not exceed $\pm 0.5 \text{ lb/ft}^3$ (8 kg/m^3) of soil from the moisture content determined by the nuclear method, then adjustment of the calibration curve is not needed and should not be made.

6.3.2 If each of the moisture content determinations made by any of the above calibration methods is more than the corresponding moisture content by the nuclear method, adjust each subsequent nuclear determination by adding the average difference.

6.3.3 If each of the moisture content determinations made by any of the above calibration methods is less than the corresponding moisture content by the nuclear method, adjust each subsequent nuclear determination by subtracting the average difference.

6.3.4 The average difference obtained by 6.3.2 or 6.3.3 may be used to plot a corrected calibration curve which shall be parallel to the original calibration curve and offset by the amount and direction as indicated in 6.3.2 or 6.3.3.

7. Procedure

7.1 *Standardization*—Standardization of equipment on a reference standard is required at the start of each day's use as follows:

7.1.1 Warm up the equipment in accord-

ance with the manufacturer's recommendations.

7.1.2 Take at least four repetitive readings of at least 1 min each with the gage on the reference standard. This constitutes one standardization check.

7.1.3 If the mean of the four repetitive readings is outside the limits set by Eq 1 below, repeat the standardization check. If either the first or the second attempt satisfies Eq 1, the equipment is considered to be in satisfactory operating condition; continue with the procedure in 7.2. The empirical relationship for the standardization check is as follows:

$$N_s = N_o \pm 1.96\sqrt{N_o} \quad (1)$$

where:

N_s = mean of repetitive readings (see 7.1.2) and

N_o = previously established count for the reference standard (mean of ten repetitive readings).

7.1.4 If the second attempt in 7.1.3 does not satisfy Eq 1, check the system and repair the instrument if necessary. It is possible to use the instrument in this condition if a satisfactory calibration relationship can be established.

7.1.5 Establish a new N_o by computing the mean of ten repetitive readings on the reference standard.

7.1.6 Check the calibration curve in accordance with 6.2 and, if necessary, adjust the calibration curve in accordance with 6.3.

7.2 *Test Site Preparation*—Select a location for test where the gage in test position will be at least 6 in. (approximately 152 mm) away from any vertical projection.

7.2.1 Prepare the test site in the following manner:

7.2.1.1 Remove all loose and disturbed material, and remove additional material as necessary to reach the top of the vertical interval to be tested (Note 4).

7.2.1.2 Prepare a horizontal area, sufficient in size to accommodate the gage, by planing to a smooth condition so as to obtain maximum contact between the gage and material being tested.

7.2.1.3 The maximum depressions beneath the gage shall not exceed approximately $\frac{1}{8}$ in. (3.2 mm). Use native fines or fine sand to fill

D 3017

voids and level the excess with a rigid plate or other suitable tool.

NOTE 4—The spatial bias should be considered in determining the depth at which the gage is to be seated.

NOTE 5—The placement of the gage on the surface of the material to be tested is critical to the successful determination of moisture. The optimum condition is total contact between the bottom surface of the gage and the surface of the material being tested. This is not practically possible in all cases and therefore it becomes necessary to use a sand filler or similar material. The depth of sand fill should not exceed $\frac{1}{8}$ in. (approximately 3.2 mm) and the total area filled should not exceed 10 percent of the bottom area of the gage. Several trial seatings may be required to achieve these conditions.

7.3 *Testing*—Proceed with testing in the following manner:

7.3.1 Seat the gage firmly.

7.3.2 Keep all other radioactive sources away from the gage (as recommended by the manufacturer) so as not to affect the readings.

7.3.3 Use sufficient warm-up time as in standardization (7.1.1).

7.3.4 Place the source in the use position and take one or more 1-min readings.

8. Calculations

8.1 Average the readings obtained in 7.3.4.

8.2 Determine the moisture content by use of an applicable calibration curve.

8.3 Calculate the moisture content, w , in percent of dry weight of soil as follows:

$$w = (W_m/W_d) \times 100 \quad (2)$$

where:

W_m = moisture content of soil, lb/ft³ (kg/m³) and

W_d = dry weight of soil, lb/ft³ (or kg/m³)

9. Report

9.1 The report shall include the following:

9.1.1 Location.

9.1.2 Elevation of surface.

9.1.3 Visual description of material.

9.1.4 Identification of test equipment (make, model, and serial number).

9.1.5 Count rate for each reading.

9.1.6 Moisture content in pounds per cubic foot (kilograms per cubic meter).

9.1.7 Wet unit weight.

9.1.8 Dry unit weight, and

9.1.9 Moisture content in percent of weight.

10. Precision

10.1 Determine the precision of the system P , from the slope of the calibration curve and the standard deviation, σ , of the signal (detected neutrons) in counts per minute follows:

$$P = \sigma/S$$

10.2 Where the slope of the calibration curve is determined at the 10-lb/ft³ (1 kg/m³) point and the standard deviation, determined from ten repetitive readings, 1 min each (the gage is not moved after the seating) taken on material having a moisture content of 10.0 ± 0.6 lb/ft³ (160 ± 10 kg/m³) the value of P shall be less than 0.30 lb (4.8 kg/m³).

APPENDIX

A1. NOTES ON THE NUCLEAR TEST

A1.1 The equipment used in this method is of the surface type as opposed to that designed for use in deep borings. In general, and neglecting the associated electronics, this equipment consists of three principal elements: (1) a suitable nuclear source emitting fast neutrons; (2) a detector sensitive to these neutrons after they are modified by passing through the material being tested; and (3) a counter, with provisions for automatic and precise timing, for determining the rate at which the modified neutrons arrive at the detector. While rate meters are suitable, in principle, counters are commonly used. In general, any source of sufficiently numerous and properly energetic neutrons can be used in measuring the moisture content of soil and soil-aggregate. The sources most commonly used,

however, are americium-beryllium and radium-beryllium with the latter normally being used in deep purpose instruments that are designed to also determine wet or total density of soil and soil-aggregates. Detectors used are gas filled tubes of boron trifluoride and scintillation crystals or fission chambers. Detectors of the latter type offer the potential of varying the range of energies of the neutrons that are counted.

A1.2 Measurements are made using fast neutrons that reflect modification by backscattering through the material under test. When high-energy neutrons are scattered into the soil a loss in velocity of each neutron occurs as it collides with the nuclei of the atoms of the soil. The rate at which this slowing down process occurs depends upon: (1) the

D 3017

of the nucleus in collision with the neutron, and (2) the probability that the two will collide.

A1.2.1 The mass of the hydrogen nucleus is nearly equal to the neutron mass. Collision with hydrogen atoms therefore, reduces the velocity of neutrons more quickly than collision with heavier nuclei. The large difference between the masses of hydrogen atoms and those normally encountered in soils means that the relative effectiveness of hydrogen atoms in slowing down neutrons is very pronounced.

A1.2.2 The probability that a neutron will collide with the nucleus of an atom is dependent on the atom's scattering cross section. For most elements, this value is low, usually increasing with decrease in neutron energy. The scattering cross section of the hydrogen atom for high energy neutrons, however, is larger than for most of the other atoms present in soils.

A1.2.3 These two features in combination make hydrogen the most effective medium for reducing the velocity of fast neutrons. If a detector of thermal (slow) neutrons is placed near a neutron source in a soil containing hydrogen, the activity registered is due almost entirely to neutrons that have been slowed down by hydrogen atoms. Other atoms present in the soil play a negligible part in this process. In natural soils hydrogen may be present in several forms but, with some exceptions, it occurs principally in the water held by the soil particles. Therefore, the "slow neutron" activity registered by a suitable detector can be related to the concentration of water in a soil by calibration.

A1.3 The determination of moisture content by the nuclear means of this method is indirect. To date no theoretical approach has been developed that predicts the count rate for given equipment, geometry, material, density, and moisture content. As a result the relation between soil moisture and nuclear count rate is determined by correlation tests of materials at known moisture content. Individual equipment manufacturers supply a calibration curve with each set of their equipment. It has been found that these curves do not necessarily hold for all soils and soil-aggregates because of differences in chemical composition. Apparent variations in calibration curves may also be induced by differences in seating, in background count, and other test variations. Because of these considerations, provisions are included in this method for checking for variations or changes. Different approaches may be used in checking calibration curves and those in more general use are given. For good practice these should be followed with newly purchased equipment and with major component replacement of in-service equipment.

A1.4 The moisture content determined by this method is the amount of moisture that is contained in a given volume of soil. It should be noted that the volume of soil and soil-aggregate represented in the measurement is indeterminate and will vary with the source-detector geometry of the equipment used and with the characteristics of the material tested. In general, and with all other conditions constant, the greater the moisture content of the material, the smaller the volume involved in the

measurement. Unlike oven drying tests, the moisture content so determined is not necessarily the average moisture within the volume involved in the measurement. For the usual surface test equipment and materials, for example, about 50 percent of the measured count rate is determined by the upper 3 to 4 in. (76 to 101 mm) of soils and soil-aggregate.

A1.5 The number of fast neutrons emitted from a given source over a given time period are statistically random, and follow a Gaussian distribution. Because of this, the actual number of modified neutrons that are detected and counted in the moisture measuring process should be sufficiently large to minimize the probability that the observed count reflects unacceptable variations. This is reflected in the standard deviation which is the square root of the total count. The over-all system accuracy in determining moisture is also statistical in nature and appears to vary with equipment used, test conditions of laboratory versus field, materials, and operators. Because of these variables it is not possible to give precise numbers for system accuracy and precision for these test methods. It is believed, however, that if the procedures herein are carefully followed, the standard deviation of the nuclear measured values, in terms of accuracy, will not be greater than on the order of some 0.5 to 1.0 lb of water per cubic foot (8 to 16 kg/m³) of soil. Precision, determined without moving the test equipment, should be better than 0.3 lb of water per cubic foot (5 kg/m³) of soil.

A1.6 One of the fast neutron sources used, americium, is manmade and as such its use is regulated by the Federal government through the Atomic Energy Commission as well as by some State and local governments. Because radium and beryllium are naturally occurring materials, their use is not now regulated by the Federal government but is regulated by some State and local governments. Among others, the objectives of these regulations are the use of radioactive materials in a manner safe to the operator and all others.

A1.7 The in-place nuclear moisture tests of this method offer several advantages over conventional methods, such as oven drying of samples, particularly in tests performed for the continuing control of construction. Its greatest advantage is perhaps the short time required to obtain a moisture content. An answer is available on the spot in a matter of minutes after completing the test. When conducting both moisture and density tests many more tests per day can be conducted than by older methods in current use. In addition, apparently erratic measurements can be immediately detected and checked since the nuclear tests are more nearly nondestructive. These advantages accrue to organizations that are engaged in moisture measurements on a more or less continuous basis. Organizations that make infrequent or occasional moisture determinations may find that the advantages of the nuclear methods can be offset by maintenance and start up considerations such as periodically charging batteries, maintaining radiation exposure records, etc.

By publication of this standard no position is taken with respect to the validity of any patent rights in connection therewith, and the American Society for Testing and Materials does not undertake to insure anyone utilizing the standard against liability for infringement of any Letters Patent nor assume any such liability.



Designation: D 2216 - 71

American National Standard A37.141-1972
Approved Jan. 28, 1972 by
American National Standards Institute

Standard Method of LABORATORY DETERMINATION OF MOISTURE CONTENT OF SOIL¹

This Standard is issued under the fixed designation D 2216; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval.

1. Scope

1.1 This method covers the laboratory determination of the moisture content of soil.

2. Definition

2.1 *moisture or water content of a soil*—the ratio, expressed as a percentage, of the weight of water in a given mass of soil to the weight of the solid particles. Practical application is to determine the weight of water removed by drying the moist soil to a constant weight in a drying oven controlled at 230 ± 9 F (110 ± 5 C) and to use this value as the weight of water in the given soil mass. The weight of soil remaining after oven-drying is used as the weight of the solid particles.

3. Apparatus

3.1 *Drying Oven*, thermostatically-controlled, preferably of the forced-draft type, capable of being heated continuously at a temperature of 230 ± 9 F (110 ± 5 C).

3.2 *Balances*, sensitive to 0.01 g for samples weighing 100 g or less, sensitive to 0.1 g for samples weighing between 100 and 1000 g, or sensitive to 1 g for samples weighing over 1000 g.

3.3 *Containers*—Suitable containers made of material resistant to corrosion and not subject to change in weight or disintegration on repeated heating and cooling. Containers shall have close-fitting lids to prevent loss of moisture from samples before initial weighing and to prevent absorption of moisture from the atmosphere following drying and before final weighing. One container is needed for each moisture content determination.

4. Test Sample

4.1 Select a representative quantity of moist soil in the amount indicated in the method of test. If no amount is indicated, the minimum weight of the sample shall be in accordance with the following table:

Maximum Particle Size	Minimum Weight of Sample, g
No. 40 (425- μ m) sieve	10
No. 4 (4.75-mm) sieve	100
1/2 in. (12.5 mm)	300
1 in. (25.0 mm)	500
2 in. (50 mm)	1000

5. Procedure

5.1 Weigh a clean, dry container with its lid, and place the moisture content sample in the container. Replace the lid immediately, and weigh the container, including the lid and the moist sample. Remove the lid and place the container with the moist sample in the drying oven maintained at a temperature of 230 ± 9 F (110 ± 5 C) and dry to a constant weight (Notes 1 and 2). Immediately upon removal from the oven, replace the lid and allow the sample to cool to room temperature. Weigh the container including the lid and the dried sample (Notes 3 and 4).

NOTE 1—Checking every moisture content sample to determine that it is dried to a constant weight is impractical. In most cases, drying of a moisture content sample overnight (15 or 16 h) is sufficient. In cases where there is doubt concerning the adequacy

¹This method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-18 on Soil and Rock for Engineering Purposes. Current edition approved Sept. 25, 1971. Originally issued 1963. Replaces D 2216 - 66.

D 2216

of overnight drying, drying should be continued until the weights after two successive periods of drying indicate no change in weight. Samples of sand may often be dried to constant weight in a period of several hours. Since dry soil may absorb moisture from wet samples, dried samples should be removed before placing wet samples in the oven.

NOTE 2—Oven-drying at 230 ± 9 F (110 ± 5 C) does not result in reliable moisture content values for soil containing gypsum or other minerals having loosely bound water of hydration or for soil containing significant amounts of organic material. Reliable moisture content values for these soils can be obtained by drying in an oven at approximately 140 F (60 C), or by vacuum desiccation at a pressure of approximately 10 mm Hg and at a temperature not lower than 73 F (23 C).

NOTE 3—A container without a lid may be used provided the moist sample is weighed immediately after being taken and providing the dried sample is weighed immediately after being removed from the oven or after cooling in a desiccator.

NOTE 4—Moisture content samples should be discarded and should not be used in any other tests.

6. Calculation

6.1 Calculate the moisture content of the soil as follows:

$$w = \frac{[(\text{weight of moisture})/(\text{weight of oven-dry soil})]}{\times 100} \\ = [(W_1 - W_2)/(W_2 - W_c)] \times 100$$

where:

w = moisture content, %

W_1 = weight of container and moist soil, g,

W_2 = weight of container and oven-dried soil, g, and

W_c = weight of container, g.

By publication of this standard no position is taken with respect to the validity of any patent rights in connection therewith, and the American Society for Testing and Materials does not undertake to insure anyone utilizing the standard against liability for infringement of any Letters Patent nor assume any such liability.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD

J I S

Method of Test for
Moisture Content of SoilsA 1203-1978
(Reaffirmed: 1983)1. Scope

This Japanese Industrial Standard specifies the method of test to obtain moisture content of soils in a laboratory.

2. Definitions

For the purposes of this standard the following definitions shall apply:

- (1) moisture content of soils The moisture content removed from wet soils by furnace-drying at 110°C. In general it shall be expressed by moisture content ratio.
- (2) moisture content ratio of soils The ratio of the moisture content of soils to the mass of furnace-dried soils expressed by mass percentage.

3. Test Apparatus

3.1 Container The container with a lid which is capable of being closed tightly so as the moisture content not to escape during the measurement of mass.

3.2 Constant-Temperature Drying Furnace The constant-temperature drying furnace shall be able to keep the temperature at 110°C.

3.3 Balance The balance shall have a reciprocal sensibility of 0.01 g for weighing capacity of less than 100 g, of 0.1 g for weighing capacity from 100 g up to and excluding 1000 g, or of 1 g for weighing capacity not less than 1000 g.

3.4 Desiccator The desiccator of 240 mm or 300 mm specified in JIS R 3503, containing hygroscopic agent such as silica gel, calcium chloride, etc.

Applicable Standard:

JIS R 3503-Glass Apparatus for Chemical Analysis

4. Method of Test

4.1 Sample Take a proper amount of sample according to the purposes of test.

4.2 Sequence of Test

4.2.1 Put the sample into a container to weigh its mass. The balance used shall have a weighing capacity corresponding to the measuring mass.

4.2.2 Furnace-dry the sample at 110°C till it becomes a constant mass. Cool the furnace-dried sample in a desiccator till it becomes room temperature, and weigh the mass of furnace-dried soils and the container. The balance used shall have a weighing capacity corresponding to the measuring mass.

5. Calculation

The moisture content ratio w shall be obtained from the following formula:

$$w = \frac{\text{mass of moisture in wet soils}}{\text{mass of furnace-dried soils}} \times 100$$

$$= \frac{m_a - m_b}{m_b - m_c} \times 100 (\%)$$

where

- m_a : mass of container and wet soil (g)
- m_b : mass of container and furnace-dried soils (g)
- m_c : mass of container (g)

A 1203-1978
Edition 1

Japanese Text

Established by Minister of International Trade and Industry

Date of Establishment: 1950-11-10

Date of Revision: 1978-07-04

Date of Reaffirmation: 1983-03-05

Date of Public Notice in Official Gazette: 1983-03-05

Investigated by: Japanese Industrial Standards Committee

Divisional Council on Architecture

Technical Committee on Method of Soil Test

This English translation is published by:

Japanese Standards Association

1-24, Akasaka 4, Minato-ku,

Tokyo 107 Japan

© JSA, 1983

Printed in Tokyo by
Hohbunsha Co., Ltd.

Methods of soil analysis for water management for agricultural purposes

Physical laboratory tests
Determination of water content of soil

DIN
19 683
Part 4

Bodenuntersuchungsverfahren im landwirtschaftlichen Wasserbau; physikalische Laboruntersuchungen; Bestimmung des Wassergehaltes des Bodens

As it is current practice in standards published by the International Organization for Standardization (ISO), the comma has been used throughout as a decimal marker.

It is recommended to resort to the services of specialists and to make use of specialized laboratories in connection with the laboratory tests.

1 Concept

For the purposes of this standard, the water content w of a soil means the quantity of water contained in the soil. It is expressed in % by weight (w_g), with respect to the mass of a soil sample dried at 105 °C, or in % by volume (w_v), with respect to the volume of the soil sample.

2 Field of application

Determination of the water content of the soil for the assessment of a reference value for different methods of analysis; assessment of physical properties of a soil, for example its irrigation or drainage requirements.

3 Procedure

3.1 Determination of water content, in % by weight

For determination of the water content, the soil sample (10 to 20 g) shall be taken in an appropriate depth of the soil (for example by using a type A or type B grooved soil sampler as specified in DIN 19671), placed in a dry, weighed weighing glass provided with a cover and weighed. The open weighing glass containing the sample shall then be placed in the drying oven and dried at 105 °C until the weight is constant (approximately 15 hours). After the drying process, the open weighing glass containing the sample shall be placed in a desiccator and weighed again, after cooling to room temperature.

3.2 Determination of water content, in % by volume

The sample shall be taken using a cylindrical core-cutter (see also DIN 19672 and DIN 19681), freshly weighed and dried at 105 °C until the weight is constant. Cooling in the desiccator and weighing shall be carried out in accordance with subclause 3.1.

1) See DIN 19683 Part 12.

4 Calculation and example

4.1 Calculation of the water content w_g , in % by weight :

$$w_g = \frac{G_f - G_t}{G_t - T} \cdot 100$$

where

G_f is the tare weight and the wet soil, in g;

G_t is the tare weight and the soil dried at 105 °C, in g;

T is the tare weight, in g.

Example:

$$w_g = \frac{50,54 - 47,52}{47,52 - 34,47} \cdot 100 = 23,1 \text{ \% by weight}$$

The result shall be rounded to the nearest 0,1 % by weight.

4.2 Calculation of the water content w_v , in % by volume :

$$w_v = \frac{G_f - G_t}{V} \cdot 100$$

where

G_f is the tare weight and the wet soil, in g;

G_t is the tare weight and the soil dried at 105 °C, in g;

V is the volume of the soil sample, in cm³.

Example:

$$w_v = \frac{271,5 - 239,25}{99,5} \cdot 100 = 32,4 \text{ \% by volume}$$

The result shall be rounded to the nearest 0,1 % by volume.

1 % by volume of the water content of the soil corresponds to a water height of 1 mm in a soil layer of 10 cm.

Conversion of w_g to w_v :

$$w_v = w_g \cdot \rho_t$$

ρ_t = bulk density¹⁾; mean value is 1,5 g/cm³ for mineral soils of low or high humus content.

No part of this standard may be reproduced without the prior permission of DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin. In case of doubt, the German language original shall be consulted as the authoritative text.

(3) *Emulsified oil or emulsified asphaltic bitumen stabilization.* Sufficient water shall be incorporated with the soil to bring the soil mortar approximately to the plastic limit (see Test 3 of BS 1377 : 1975).

The material shall be mixed, either in a mechanical mixer, or by hand using a spatula or other suitable tool, for 10 min or until it is judged by visual inspection that adequate dispersion of the water has been obtained, care being taken to minimize loss of moisture in mixing. The moist soil shall be allowed to stand for 24 h in an airtight container.

The required quantity of emulsion, diluted with distilled water if it is considered necessary, shall then be added to the soil and mixing started. Additional water shall be added if necessary during the mixing, to ensure a uniform distribution of the emulsified stabilizer. Any other additive shall be incorporated in a manner appropriate to the process of stabilization under consideration (see Note 2).

The mixture shall then be allowed to dry uniformly in air until it has the moisture content required for the subsequent test.

(4) *Oil, asphaltic bitumen and other stabilizers.* The required amount of water shall be incorporated in the soil by mixing thoroughly to a uniform condition in a mechanical mixer, or by hand using a spatula or other suitable tool, care being taken to minimize loss of moisture. The moist soil shall be allowed to stand for 24 h in an airtight container. The required quantity of stabilizer and any other additive shall be incorporated in the soil in a manner appropriate to the process under consideration (see Note 2).

1.5.3.2.4 *Initial preparation of stabilized soils.* The procedures are as follows.

(1) *For Tests 1(A), 1(B), 1(C) and 2 (moisture content determinations).* If moisture contents of the stabilized soil as received are required by any of these methods, the procedure described in 1.5.3.2.2 (1) for natural soils shall be followed.

(2) *For Tests 3, 4 and 5 (compaction tests).* It is not regarded as being generally appropriate for compaction tests to be carried out on site mixed material as the optimum moisture content should usually be known before this stage of the work is reached.

(3) *For Tests 6, 7, 8, 9(A) and 9(B) (density determinations).* These are site tests for which no sample preparation is required.

(4) *For Tests 10, 11, 12 and 13 (strength tests).* For fine-grained cohesive soils the sample as received may have compacted aggregations that have been produced as a result of mixing. For mixes prepared in a laboratory mixer it is recommended that all the material shall be passed through a 20 mm BS test sieve by working material greater than 20 mm through the mesh. The material shall then be remixed thoroughly by hand before preparing the test specimens. This procedure will result in a more uniformly compacted specimen. For mixes taken from construction site work, the specimens shall be made from all the mixed material and the size of the specimen used shall be determined by the size of the aggregations of stabilized soil produced by the mixing plant.

For materials that are stabilized with cement it is essential that compaction takes place as quickly as possible after the mixing is completed, otherwise considerable loss in strength may occur as a result of the hydration of the cement meanwhile.

(5) *For Tests 14, 15, 16, 17 and 18 (stabilizer content determinations and miscellaneous tests).* The preparation of the samples for these tests is given under the respective test procedures.

NOTE 1. Air drying has been specified in the preparation of soil samples for testing since with some soils irreversible changes take place in the soil when it is oven dried at 105 °C to 110 °C. With many soils, however, this effect is of negligible practical significance. Organic soils and certain tropical soils are even affected by air drying and should be used in their natural state.

In the United Kingdom, samples may be air dried by leaving them spread out on trays in the laboratory with free access to air for three or four days. Some silts and clays without large particle sizes may be used in their natural state for certain tests instead of being air dried.

NOTE 2. The time of mixing cannot be specified in advance; guidance may be obtained from the suppliers of the stabilizer or by means of preliminary trials. It should be noted that in some instances, excessive mixing has been found to be deleterious.

* 2. Determination of the moisture content

2.1 Test 1(A). Determination of the moisture content of soils stabilized with non-volatile stabilizers: standard method (oven drying method)

2.1.1 *General.* This method covers the determination of the moisture content of stabilized soil as a percentage of the oven dry mass of solids (see Note 1). It is applicable to mechanically stabilized soils and to soils mixed with stabilizers which do not contain a significant proportion of volatile matter. With stabilizers containing a significant proportion of volatile matter, the distillation method described in Test 2 should be used. In cases of doubt, information should be sought from the manufacturer of the stabilizer.

BS 1924 : 1975



2.1.2 **Apparatus.** A thermostatically-controlled drying oven capable of maintaining a temperature of 105 °C to 110 °C (see Note 2) and the following items of apparatus.

For fine-grained soils.

- (1) A glass weighing bottle fitted with a ground glass stopper or cap, or a suitable airtight non-corrodible metal container (a convenient size is one 50 mm in diameter and 25 mm high).
- (2) A balance readable and accurate to 0.01 g.
- (3) A desiccator (a convenient size is one 200 mm to 250 mm in diameter) containing anhydrous silica gel (see Note 3).

For medium-grained soils.

- (1) An airtight non-corrodible container of about 500 g capacity.
- (2) A balance readable and accurate to 0.1 g.
- (3) A scoop (a convenient size is one about 200 mm long and 100 mm wide).

For coarse-grained soils.

- (1) An airtight non-corrodible container of about 3 kg capacity.
- (2) A balance readable and accurate to 1 g.
- (3) A scoop (a convenient size is one about 200 mm long and 100 mm wide).

2.1.3 Procedure

2.1.3.1 *For fine-grained soils.* The procedure is as follows.

- (1) The weighing bottle or container shall be cleaned, dried, and weighed to the nearest 0.01 g (m_1) (see Note 4). A sample of at least 30 g of stabilized soil shall be crumbled and placed loosely in the container or the weighing bottle, and the lid or stopper shall be replaced. The container or bottle and contents shall then be weighed to the nearest 0.01 g (m_2).
- (2) The lid or stopper shall then be removed, and the container or bottle with its lid and contents shall be placed in the oven and dried at 105 °C to 110 °C (see Note 5). The period required for drying will vary with the type of soil and the size of sample. The sample shall be deemed to be dry when the differences in successive weighings of the cooled sample (see operations (3) and (4)), carried out at intervals of 4 h, do not exceed about 0.1 % of the original mass of the sample (see Note 6). The lid or stopper shall not be replaced while the sample is in the oven.
- (3) After drying, the container or bottle and contents shall be removed from the oven and the whole placed in the desiccator to cool (see Note 7).
- (4) The lid shall be replaced and the container or bottle and contents shall then be weighed to the nearest 0.01 g (m_3).

2.1.3.2 *For medium-grained soils.* The procedure is as follows.

- (1) The container shall be cleaned, dried and weighed to the nearest 0.1 g (m_1). A sample of at least 300 g of stabilized soil shall be crumbled and placed loosely in the container and the lid shall be replaced. The container and contents shall then be weighed to the nearest 0.1 g (m_2).
- (2) The lid shall then be removed and the container and contents shall be placed in the oven and dried at 105 °C to 110 °C (see Note 5). The period required for drying will vary with the type of soil and the size of sample. The sample shall be deemed to be dry when the differences in successive weighings of the cooled sample (see operations (3) and (4)), carried out at intervals of 4 h, do not exceed about 0.1 % of the original mass of the sample (see Note 6). The lid shall not be replaced while the sample is in the oven.
- (3) After drying, the lid shall be replaced and the whole allowed to cool.
- (4) The container and contents shall then be weighed to the nearest 0.1 g (m_3).

2.1.3.3 *For coarse-grained soils.* The procedure is as follows.

- (1) The container shall be cleaned, dried, and weighed to the nearest 1 g (m_1). A sample of at least 3 kg of stabilized soil shall be crumbled and placed loosely in the container and the lid replaced. The container and contents shall then be weighed to the nearest 1 g (m_2).
- (2) The lid shall be removed and the container and contents shall be placed in the oven and dried at 105 °C to 110 °C (see Note 5). The period required for drying will vary with the type of soil and the size of sample. The sample shall be deemed to be dry when the differences in successive weighings of the cooled sample (see operations (3) and (4)), carried out at intervals of 4 h, do not exceed about 0.1 % of the original mass of the sample (see Note 6). The lid shall not be replaced while the sample is in the oven.
- (3) After drying, the lid shall be replaced and the whole allowed to cool.
- (4) The container and contents shall then be weighed to the nearest 1 g (m_3).

2.1.4 Calculations*. In the case of soil stabilized with a solid stabilizer the moisture content, w' , shall be calculated as a percentage of the dry soil plus stabilizer mass from the equation:

$$w' = \frac{(m_2 - m_3) \times 100}{m_3 - m_1} (\%)$$

where

m_1 is the mass of container (g);

m_2 is the mass of container and wet stabilized soil (g);

m_3 is the mass of container and dry stabilized soil (g).

In the case of soil stabilized with a fluid stabilizer, the moisture content, w , shall be calculated as a percentage of the dry soil mass from the equation:

$$w = \frac{(m_2 - m_3) \times (100 + s)}{m_3 - m_1}$$

where

s is the non-aqueous fluid stabilizer content of the stabilized soil (%).

2.1.5 Reporting of results. The moisture content of the stabilized soil, w' or w , shall be reported to two significant figures. The method used to obtain the result shall be stated.

Notes on Test 1(A)

NOTE 1. *Soils stabilized with cement or lime.* The measured moisture contents of cement or lime-stabilized soil samples are misleadingly low because the water of hydration of the cement or of the lime-clay reaction cannot be removed by normal drying processes. The error in the result depends on a number of factors, the chief of which are the age of the sample and the speed with which the water is removed once the sample is placed in the oven. It may be as high as 20 % of the stabilizer content for samples that are older than 28 days, or in cases where because of the large size of sample taken or because of overloading of the oven, drying is very slow (see also Note 6).

NOTE 2. A microwave oven may be employed provided preliminary tests show that the soil does not exceed a temperature of 110 °C before all the water is driven off. If a microwave oven is used metal containers are not suitable and the soil should be dried in glass, silica or polytetrafluoroethylene (PTFE) evaporating dishes.

NOTE 3. It is preferable to use self-indicating silica gel as the desiccant. Calcium chloride should not be used as it is known that many clays when oven dry are capable of absorbing water from it.

NOTE 4. It is convenient when many containers are in use to bring them to a standard mass. In the case of 50 mm diameter tins, solder may be added to the lid to bring the mass to, say, 30.00 g.

NOTE 5. *Soils containing gypsum.* Certain soils contain gypsum which on heating loses its water of crystallization. The moisture content determined by this method will be affected by approximately 0.2 % for each 1 % of gypsum. If it is suspected that gypsum is present in the soil, the moisture content samples should be dried at not more than 80 °C, and possibly for a longer time. State in the test the drying conditions used if the standard conditions are not used.

NOTE 6. *Drying time of soils.* 16 h to 24 h is usually a sufficient length of time for drying most soils, but certain soil types and large or very wet samples will require longer. The drying time will also depend on the amount of material in the oven, the size of the oven and the efficiency of the ventilation system.

NOTE 7. If the lids of the containers fit well and it is unlikely that the samples are to be left for a considerable time before weighing, they need not be placed in the desiccator to cool unless glass weighing bottles with ground glass stoppers have been used.

2.2 Test 1(B). Determination of the moisture content of soils stabilized with non-volatile stabilizers: subsidiary method (sand bath method)

2.2.1 General. This method covers the determination of the moisture content of a stabilized soil as a percentage of the dry mass of solids. It is intended as a rapid alternative to Test 1(A) but is less accurate and is more suitable as a site test. The method shall not be used if the soil is stabilized with a fluid stabilizer nor shall it be used if the soil contains a large proportion of gypsum, calcareous matter or organic matter.

2.2.2 Apparatus. The following apparatus is required.

For fine-grained soils.

- (1) A suitable airtight, non-corrodible metal container, approximately 50 mm in diameter and 25 mm deep.
- (2) A balance readable and accurate to 0.1 g.
- (3) A sand bath approximately 200 mm in diameter containing clean sand to a depth of at least 25 mm. A larger bath may be used to heat several samples at once.
- (4) Equipment for heating the sand bath, e.g. a bottled gas or paraffin pressure stove.
- (5) A palette knife (a convenient size is one having a blade 100 mm long and 20 mm wide).

* See Form A, Appendix A.

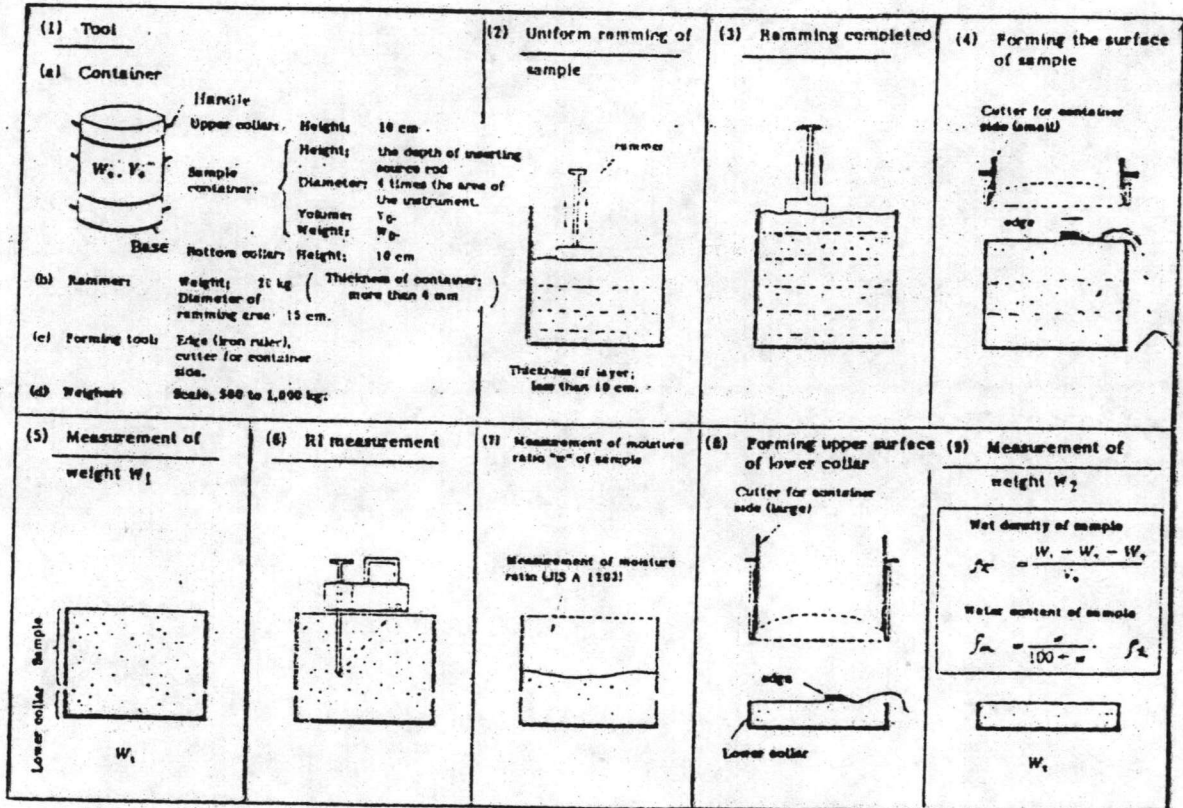


Figure 4. Method of Creating Calibration Curve with Soil

บทที่ 3

อิฐและผลิตภัณฑ์ดิน

Brick and Clay Products

ผลิตภัณฑ์ดินที่สำคัญที่ใช้ในทางโครงการสร้างมี อิฐก่อสร้าง (building brick) หน่วยอิฐ (masonry units) อิฐพื้น (paving brick) อิฐทนไฟ (firebrick) เทรราคอตทา (terra cotta) และกระเบื้อง (tile) ต่าง ๆ

อิฐก่อสร้างปรกติทำจากสารผสมของดินกับทราย บางทีมีถ่านและสารอื่นเติมลงไปด้วย สมและปั้น จากนั้นทำให้แห้งและเผา อิฐพื้นส่วนใหญ่ใช้ปูพื้นถนน แม้ว่าบางชนิดจะเหมาะสำหรับใช้ในการก่อสร้างด้วย อิฐทนไฟทนความร้อนสูงได้ ส่วนใหญ่ใช้บุปล่องไฟ และท่อไฟ ฯลฯ

เตรราคอตทาทำจากดินที่เลือกสรรแล้ว เพื่อใช้ในการตกแต่ง

กระเบื้องทำจากการเผาดินชนิดต่างๆ มีกระเบื้องหลังคา กระเบื้องผนัง กระเบื้องพื้น ท่อกระเบื้อง และท่อน้ำเสีย เป็นต้น

ดินที่ใช้ทำอิฐ

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ดินโครงสร้าง (structural clay products) ได้แก่ แก้วดิน (clay) และดินดาด (shale) ดินเป็นสารผสมของเคโอลิไนท์ (kaolinite) กับทราย เคโอลิไนท์เป็นวัสดุที่ไม่คืนตัว (plastic material) เมื่อถูกน้ำ และจะแข็งตัวเมื่อถูกเผาอยู่ในรูปที่คงที่ ดินเหนียวที่ใช้ทำอิฐต้องมีคามไม่คืนตัว (plasticity) ที่เหมาะสมและแห้งได้เร็วโดยไม่หด ่ง หรือแตกมาก และสามารถเผาให้มีเนื้ออิฐและความแข็งแรงตามต้องการ ดินชั้น (sedimentary clays) เป็นดินที่เหมาะสมสำหรับการใช้ทำอิฐมากที่สุด ถ้าดินมีสาร แต่ถ้ามียามากเกินไปจะทำลายความเข้มข้นของอิฐ เหล็กออกไซด์ทำหน้าที่เป็นวัสดุผสม (flux) เพิ่มความแข็งและความแข็งแรงให้กับอิฐ ทำให้อิฐมีสีแดงเป็นสัดส่วนกับปริมาณเหล็กออกไซด์ ปูนขาวถ้ามียากกว่าเหล็กมากอิฐจะมีสีเหลืองและหดตัวมาก แมกนีเซียมและอัลคาไลทำหน้าที่เป็นวัสดุประสาน

ผลิตภัณฑ์ดินโครงสร้าง

วิธีการผลิตภัณฑ์ดินโครงสร้างธรรมดาที่ใช้กันมากมี 3 วิธี คือกระบวนการโคลนแข็ง (stiff-mud process) กระบวนการโคลนอ่อน (soft-mud process) และกระบวนการอัดแห้ง (dry-press process) หลักมูลฐานในการเตรียมดินเหมือนกันทั้ง 3

กระบวนการผลิตภัณฑ์ดินโครงสร้างอาจแบ่งออกเป็นขั้นได้ดังต่อไปนี้ :

- (1) การเลือกดินที่เหมาะสมและการขุดจากพื้นดิน (selection and winning)
- (2) การเก็บ (storage)
- (3) การเตรียมดิน รวมถึงการทำดินให้สะอาด เอาหินออก บด และร่อน (preparation of clay)
- (4) การผสม (mixing) และการคลุก (tempering) ให้มีความไม่คืนตัว สม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียว
- (5) การทำให้เป็นรูปร่างตามต้องการ (shaping) โดยใช้แม่พิมพ์ เครื่องตัด การปั้น ฯลฯ
- (6) การทำแห้ง (drying) โดยวิธีธรรมชาติหรือเทียม
- (7) การเผา (burning) ปรกติใช้เตาเผา

กระบวนการโคลนแข็งในการผลิตอิฐ

ในกระบวนการโคลนแข็ง ดินที่ใช้ต้องมีความชื้นพอดีที่จะเชื่อมแน่นกันภายใต้ความดันเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นการประหยัดเวลาในการทำแห้งและเชื้อเพลิงในการเผา ดินที่ผ่านการคลุกจะถูกส่งเข้าเครื่องจักรทำอิฐเป็นแถวผ่านแม่พิมพ์ที่ทำให้เป็น อิฐมีรูปร่างตามต้องการ หรือเป็นกระเบื้องกลวง (hollow tile) หรือผลิตภัณฑ์ดินอย่างอื่น เมื่อแถวดินออกจากเครื่องผ่านไต้จะตัดด้วยลวดให้มีความยาวตามต้องการ

ในกระบวนการโคลนแข็งนอกจากที่ได้กล่าวมานี้ ยังได้มีกระบวนการลดอากาศ (deairing) ในวิธีนี้มีห้องลดอากาศติดอยู่กับเครื่องจักรส่วนที่ดินผ่านดินถูกบดในห้องลดอากาศภายใต้ความดันสูญญากาศ 15-29 นิ้ว วิธีการลดอากาศเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับดินทำให้การทำงานกับดินดีขึ้นและมีความคืนตัวสูง และสามารถใช้น้ำที่คุณภาพต่ำมาทำอิฐได้ อย่างไรก็ดีดินบางอย่างไม่เหมาะกับการใช้วิธีการลดอากาศ

กระบวนการโคลนอ่อนในการผลิตอิฐ

ในกระบวนการโคลนอ่อนผลิตภัณฑ์ดินโครงสร้างทั้งหมดขึ้นด้วยเครื่องจักรยกเว้นผลิตภัณฑ์พิเศษ กระบวนการนี้ ใช้สำหรับดินที่แฉะเกินไปที่จะอัดผ่านแม่พิมพ์ได้โดยไม่มีการทำแห้ง จึงต้องบั่นเสียก่อน ในโรงทำอิฐที่ทันสมัยอิฐจะถูกขึ้นภายใต้ความดันในเครื่องจักรทำอิฐโคลนอ่อน (soft-mud brick machine) ดินที่คลุกแล้วในเครื่องจะถูกอัดเข้าแม่พิมพ์ปาดหน้าแม่พิมพ์เอาดินที่เกินออก เอาแม่พิมพ์ออก แล้วนำไปทำแห้งโดยเร็วที่สุด

แม่พิมพ์จะต้องใช้ทรายทากายในแม่พิมพ์มิให้ดินติดแม่พิมพ์ หรืออาจใช้น้ำฉีดแม่พิมพ์หรือจุ่มแม่พิมพ์ลงในน้ำแทน วิธีใช้ทรายทากายจะทำให้อิฐที่สะอาดและมีมุมแหลมกว่าวิธีใช้น้ำฉีด

กระบวนการอัดแห้งในการผลิตอิฐ

กระบวนการอัดแห้งสามารถใช้ดินที่คืนตัวได้ (non-plastic) และค่อนข้างแห้งได้สำหรับผลิตภัณฑ์คุณภาพสูงดินที่ใช้มีความชื้น 7-10% เมื่อเดินผ่านเครื่องทำเป็นเม็ด เครื่องบดและคลุกแล้ว จะถูกส่งเข้าสู่แม่พิมพ์ในเครื่องจักรอัดแห้ง (dry-press machine) ความดันที่ใช้อัด 550-1,500 ปอนด์/ตารางนิ้ว (38.7-106 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)

อิฐทำจากกระบวนการอัดแห้งเป็นอิฐที่แน่นมาก มีความแข็งแรงอัดสูง และมีรูปดีส่วนมากใช้เป็นอิฐแสดงหน้า (face brick) แต่ไม่คงทนเหมือนอิฐจากกระบวนการโคลนแข็งหรือโคลนอ่อน บางทีเรียกว่าอิฐอัด

การทำแห้งในการผลิตอิฐ

ดินอิฐออกจากเครื่องจักรทำอิฐจะมีความชื้น 7-30% ขึ้นอยู่กับการใช้กระบวนการอัดแห้งโคลนแข็ง หรือโคลนอ่อน ความชื้นในดินแบ่งออกได้เป็นความชื้นสมดุลย์ (equilibrium moisture) และความชื้นอิสระ (free moisture) ความชื้นสมดุลย์คือความชื้นในวัสดุซึ่งมีความดันไอ เท่ากับความดันอากาศโดยรอบ ณ อุณหภูมิและความชื้นในอากาศที่กำหนดความชื้นอิสระคือความชื้นอื่นนอกเหนือไปจากความชื้นสมดุลย์ และส่วนใหญ่อยู่ในช่องว่าง (pore spaces) ภายในดิน ในการทำแห้งความชื้นอิสระจะหมดไป ส่วนความชื้นที่เหลือจะหมดไปในระหว่างกาเผา

ผลิตภัณฑ์ดินโครงสร้างอาจทำให้แห้งโดยวิธีธรรมชาติหรือโดยวิธีเทียม การทำแห้งโดยธรรมชาติอาจทำได้โดยการนำเอาดินที่ผ่านแม่พิมพ์แล้วบดขึ้นให้อากาศผ่านได้เต็มที่ และให้ได้รับแสงแดดทุกด้าน ให้มีหลังคาคลุมเพื่อมิให้ถูกฝนทำความเสียหายได้ อีฐทำจากกระบวนการโคลนอ่อนต้องใช้เวลา 3-6 สัปดาห์ในการทำแห้ง อีฐโคลนแข็งใช้เวลา น้อยกว่า ใช้เวลาเพียง 1 สัปดาห์

ในการทำแห้งเทียมอาจใช้เครื่องทำแห้งที่ควบคุมอุณหภูมิความชื้นในอากาศ และความเร็วลมโดยอัตโนมัติ เมื่อความชื้นอิสระออกจากดินจะทำให้เกิดการหดตัว การหดตัวเพิ่มความต้านทานต่อการไหลของความชื้นในชั้นดินที่แห้งแล้ว ถ้าการทำแห้งเป็นไปอย่างรวดเร็ว โดยใช้อากาศแห้งและร้อน ผิวนอกของอีฐจะแห้งเร็วโดยความชื้นจะหมดไปเร็วกว่าความชื้นภายในจะออกมาทัน ทำให้ผิวแข็งจะมีรอยแตกเกิดขึ้น การทำแห้งของผลิตภัณฑ์ดินควรใช้อากาศชื้นเพื่อลดอัตราการแห้งให้ถึงจุดความชื้นภายในดินออกมาสู่ผิวนอกมีอัตราความเร็วกว่าการระเหยที่ผิว วิธีนี้ดินจะแห้งอย่างสม่ำเสมอ เป็นการลดการหดตัวที่เกิดขึ้นเฉพาะที่ ทำให้การหดตัวเป็นไปโดยสม่ำเสมอ วิธีนี้อาจทำได้ โดยใช้อากาศที่มีความชื้นและให้ความร้อนแก่ดินจนความดันของไอของอากาศและดินเกือบจะเท่ากัน จากนั้นลดความชื้นในอากาศโดยการเพิ่มอุณหภูมิอากาศ ทำให้เกิดความแตกต่างของความดันไอ ซึ่งจะทำความชื้นค่อย ๆ ออกจากดินจนกระทั่งความชื้นอิสระหมดไป

วิธีใช้ในการทำแห้งเทียมสำหรับผลิตภัณฑ์ดินโครงสร้าง ประมาณ 3 วัน ณ อุณหภูมิ 38-149°C (100-300°F) ความร้อนที่ใช้อาจใช้ความร้อนที่ออกจากเตาเผาก็ได้

การเผาอีฐ

การเผาผลิตภัณฑ์ดินโครงสร้างในเตาต้องการเวลาเฉลี่ยประมาณ 3-4 วัน จากนั้นปิดเตาให้สนิทและปล่อยให้เย็นลงช้า ๆ กระบวนการเผาสามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนต่อไปนี้ :

1. ควันท้ำ (Water smoking) ต้องการระยะเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง สำหรับให้ความชื้นอิสระออกจากดิน ณ อุณหภูมิ 125-175°C (257-347°F)

2. การลดน้ำ (Dehydration) การลดน้ำคือการขับน้ำที่รวมอยู่กับอนุของดิน ซึ่งเคมีออกจากอนุของดิน ตั้งแต่ ๓ อุณหภูมิประมาณ 425°C (797°F) จนกระทั่งต่ำถึง ๓ อุณหภูมิ 750°C (1382°F)

3. การรวมออกซิเจน (Oxidation) การรวมออกซิเจนเริ่มต้นในระหว่างการลดน้ำ สารที่สันดาบได้จะถูกเผาไป คาร์บอนจะหมดไป วัสดุผสมจะถูกเปลี่ยนเป็นออกไซด์และซัลเฟอร์จะหมดไป

4. การหลอมแข็งแก้ว (Vitrification) การหลอมแข็งแก้วคือการหดตัวและการเติมช่องว่างภายในดินให้เต็ม อิฐก่อสร้างธรรมดาไม่ถึงขั้นหลอมแข็งแก้ว เพราะเผาเพียงแค่อุณหภูมิไม่เกิน 1200°C (2192°F) ๓ อุณหภูมินี้ดินจะอ่อนตัวจนถึงจุดที่ดินเม็ดใหญ่เกาะตัวกัน แต่ช่องว่างไม่ได้ปิดลงทั้งหมด อิฐพื้นเผาถึงขั้นการหลอมแข็งแก้วทำให้ที่บ้น้ำ (impervious) อิฐพื้นต้องการอุณหภูมิสูงสำหรับการหลอมแข็งแก้ว เพราะมีส่วนประกอบของวัสดุผสมอยู่น้อย

เตาเผาอิฐ

เตาเผาอิฐอาจแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ : เตาแบบครั้งคราว (intermittent kilns) และเตาแบบติดต่อกัน (continuous kilns) เตาแบบครั้งคราวยังแบ่งออกเป็นเตาแบบกระแสลมขึ้น (up-draft kilns) และเตาแบบกระแสลมลง (down-draft kilns) เตาแบบติดต่อกันมักจะใช้ในโรงทำอิฐขนาดใหญ่

เตาแบบกระแสลมขึ้น เตาเผาแบบกระแสลมขึ้นมีผนังถาวรทำด้วยอิฐก่ออิฐผนังหนา 12—16 นิ้ว โดยได้รับความร้อนจากเตาทำความร้อน (oven) ที่อยู่ภายนอก เปลวไฟและก๊าซร้อนจากเตาทำความร้อนเข้าสู่เตาเผาอิฐตามท่อไฟ (flues) ในผนัง

เตาแบบกระแสลมลง เตาแบบนี้ต้องการผนังที่ถาวรและหลังคาที่ปิดสนิท พื้นของเตาอิฐที่ท่อไฟต่อไปสู่ปล่องไฟ ได้รับความร้อนจากเตาทำความร้อนที่อยู่ข้างนอก เปลวไฟและก๊าซร้อนเข้าสู่เตาเผาตามท่อไฟที่อยู่ในแนวตั้งลงสู่เตาเผาประมาณครึ่งหนึ่งของความสูงของเตาเผาด้วยเหตุนี้ความร้อนเข้าเตาเผาตอนบนของอิฐและลงสู่ท่อไฟบนพื้น ไปสู่ปล่องไฟ โดยกระแสลมที่ออกที่ปล่องไฟ

เตาแบบกระแสดมลงมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบกระแสดมขึ้นมาก ใช้กันมากในการเผากระเบื้องดินโครงสร้าง เเทรคอตทา และอิฐที่ต้องการควบคุมความร้อนอย่างใกล้ชิดและการเผาอย่างสม่ำเสมอ

เตาแบบติดต่อกัน เตาเผาติดต่อกันที่สำคัญมี 3 แบบ : (1) แบบห้อง (chamber type) (2) แบบกลม (circular type) และ (3) แบบอุโมงค์ (tunnel type) ในเตาแบบห้องมีห้องติดต่อกันเป็นอนุกรม และแต่ละห้องมีปล่องไฟของตนเอง แต่ละปล่องไฟและท่อไฟติดต่อกันระหว่างห้องมีแผ่นปิดทางไฟ (dampers) สำหรับเปิดปิดได้ ขณะที่มีการเผาในห้องหนึ่ง เปลวไฟและก๊าซร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกบังคับให้ไปสู่ห้องอื่นที่มีอิฐที่ยังมิได้เผา แล้วจึงจะออกไปสู่บรรยากาศภายนอก ณ ปล่องไฟหนึ่ง ด้วยเหตุนี้อิฐที่ยังมิได้เผาจะได้รับการทำให้ร้อนก่อนเผา เตาแบบนี้ใช้หลักกระแสดมลง โดยมีท่อไฟอยู่บนพื้น เตาแบบนี้ค่าก่อสร้างแพงแต่ให้ปริมาณอิฐชั้นหนึ่งมาก ทั้งนี้ข้อแม้ว่าเชื้อเพลิงจะต้องเผาบนตะแกรง (grate) หรือในรางโดยไม่ถูกอิฐที่เผา

เตาเผาแบบกลมเป็นเตาเผากลมอยู่กับที่ แบ่งออกเป็นห้องตามเส้นรอบวงโดยมีห้องชั้นอยู่กลางวง อิฐก่อสร้างเมื่อออกจากห้องชั้นจะถูกเคลื่อนไปยังห้องเตาเผาต่าง ๆ ตามลำดับ ซึ่งมีการให้ความร้อนก่อนเผา การเผา และการให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ เป็นเตาที่ประหยัดและมีประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกับเตาติดต่อกันอย่างอื่น เพราะมีต้นทุนและค่าแรงงานต่ำ

เตาเผาแบบอุโมงค์เป็นเตาเผาแบบติดต่อกันที่ สร้างเป็นอุโมงค์ตรงหรือตามเส้นวงกลมผลิตภัณฑ์ดินจะถูกเผาในขณะที่ผ่านไปใ้ในอุโมงค์ มีรถพิเศษบรรทุกอิฐแล่นไปด้วยความเร็วที่พอเหมาะไปภายในอุโมงค์ มีเขตกวนน้ำ การลดน้ำ การรวมออกซิเจน การหลอมเชิงแก้วและเย็นตัว ผลิตภัณฑ์ของเตาแบบอุโมงค์อยู่ที่มีประสิทธิภาพสูงในการให้ความร้อน และการเผาผลิตภัณฑ์เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ

การแบ่งชั้นและการใช้อิฐ

อิฐก่อสร้างและหน่วยอิฐ

อิฐที่ออกจากเตาเผาอาจแบ่งออกเป็นชั้นตามคุณภาพและลักษณะของการเผาและความเสียหายที่มี อิฐที่มีรอยแตกหรือร่อนต้องจัดให้เป็นอิฐคุณภาพต่ำ อิฐธรรมดาแบ่งออกเป็น 3 ชั้น

อิฐโค้งหรืออิฐแข็ง (Arch or hard brick) เป็นอิฐที่ได้รับการเผาเกินพอ (over burned) เนื่องจากตำแหน่งที่อยู่ในเตาขณะเผาได้รับความร้อนสูง และมักจะเสีรูปร่างใช้ในการทำฐานราก และใช้ก่อแกนกลางในการก่ออิฐ

อิฐแดงหรืออิฐเผาได้ที่ (Red or well-burned brick) เป็นอิฐชั้นดีที่สุดสำหรับการก่อสร้างทั่วไป ในเตาเผาแบบกระแสม้วนขึ้นจะได้อิฐชั้นดีที่สุดประมาณครึ่งหนึ่งของอิฐทั้งหมด

อิฐอ่อน (Soft or salmon brick) เป็นอิฐที่ได้รับการเผาไม่พอเพียง มีความแข็งแรงไม่พอสำหรับการก่อสร้างชั้นหนึ่ง ใช้สำหรับก่อแกนกลางของงานก่ออิฐและใช้ในงานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงสูงหรือความทนทานมาก

ขนาดมาตรฐานของอิฐ คือ $2\frac{1}{4} \times 3\frac{3}{4} \times 8$ นิ้ว (5.7 x 9.5 x 20.0 เซนติเมตร) แต่ตามมาตรฐานไทยหรือที่เรียกกันว่าอิฐมอญ คือ 5.0x9.5x20.0 เซนติเมตร (ดูข้อกำหนดมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยท้ายบทนี้)

นอกจากอิฐธรรมดาหรืออิฐมอญแล้ว ในประเทศไทยยังมีอิฐที่รู้จักกันดีเรียกกันว่า อิฐบางบัวทอง เป็นอิฐจำพวกอิฐอัดแสดงหน้าซึ่งมีขนาด 7x11x23 เซนติเมตร

อิฐและหน่วยอิฐแสดงหน้า (Facing brick and solid masonry units)

อิฐและหน่วยอิฐแสดงหน้าทำจากดิน ดินทนไฟ (fireclay) หรือดินดาล สำหรับใช้ก่อผนังที่ไม่ฉาบปูนมีขนาดสม่ำเสมอกว่าอิฐก่อสร้าง

อิฐและหน่วยอิฐเคลือบสีรามิคแสดงหน้า (Ceramic glazed facing brick and solid masonry units)

อิฐและหน่วยอิฐเคลือบสีรามิคแสดงหน้าผลิตโดยการนำอิฐธรรมดาที่ยังมิได้เผา มาทำการฉาบเป็นชั้นบาง ๆ ด้วยสลิป (slip) ซึ่งมีส่วนผสมของดินบอลล์ (ball clay) ดินขาว (kaolin) หินแข็ง (flint) และเฟลสปาร์ (felspar) แล้วฉาบด้วยสารเคลือบใส



(transparent glaze) คล้ายแก้วอีกชั้นหนึ่ง สลึงให้สีแก่อิฐ ส่วนสารเคลือบจะหลอมตัวเมื่ออิฐถูกเผากลายเป็นความใสเรียบบนสลึงเมื่ออิฐถูกเผา

หน่วยอิฐต้านทานสารเคมี (Chemical resistant clay masonry units)

หน่วยอิฐดินต้านทานสารเคมี ใช้สำหรับการก่อสร้าง อิฐก่อ ในทางอุตสาหกรรมเคมี และใช้กับปูนก่อต้านทานสารเคมี หน่วยอิฐต้านทานสารเคมี 2 ชนิด : (1) อิฐมาตรฐาน (standard brick) ใช้ในการเพิ่มความร้อนทันทีเป็นแฟคเตอร์ใช้งานและดูดกลืนต่ำสุดไร้สำคัญ (2) อิฐการดูดกลืนต่ำสุด (minimum—absorption brick) ใช้ในการดูดกลืนต่ำสุดเป็นสิ่งสำคัญและการเพิ่มความร้อนทันทีไม่เป็นแฟคเตอร์ใช้งาน สำหรับใช้ในที่มีกรดกำมะถัน อิฐจะต้องไม่เสียน้ำหนักมากกว่า 20% ในอิฐมาตรฐาน และไม่มากกว่า 8% ในอิฐดูดกลืนต่ำสุดในการทดสอบด้วยการละลายในกรดกำมะถัน

กระเบื้องโครงสร้างแสดงหน้า (Structural—clay facing tile)

กระเบื้องดินโครงสร้างแสดงหน้าใช้สำหรับผนังไม่ฉาบปูน ผลิตโดยกระบวนการโคลนแข็งจากดินเหนียว และดินดาล

กระเบื้องโครงสร้างเคลือบซีรามิกแสดงหน้า (Ceramic glazed structural—clay facing tile)

กระเบื้องโครงสร้างเคลือบซีรามิกแสดงหน้าผลิตขึ้นและแบ่งชั้นคล้ายกับอิฐและหน่วยอิฐเคลือบซีรามิกแสดงหน้า

กระเบื้องผนังรับน้ำหนักบรรทุก (Structural—clay load-bearing wall tile)

กระเบื้องผนังดินโครงสร้างรับน้ำหนักบรรทุกผลิตจากดิน ดินเหนียว ดินดาล หรือสารผสมของดินที่กล่าว ปรกติใช้กระบวนการโคลนแข็ง กระเบื้องจะถูกเผาในเตาเผาแบบอุโมงค์ หรือเตาเผาแบบกระแสมลึง กระเบื้องที่มีช่องกลวงขนานกับด้านหน้าของกระเบื้อง

(end construction) ในผนังที่รับน้ำหนักบรรทุกให้เรียงให้ช่องกลวงอยู่ในแนวตั้ง สำหรับ
กระเบื้องที่มีช่องกลวงขนานกับด้านยาวของกระเบื้อง (side-construction) ใช้เรียงในผนัง
ให้ช่องกลวงอยู่ในแนวนอน

กระเบื้องไม่รับน้ำหนักบรรทุก (Structural clay non-load bearing tile)

กระเบื้องดินโครงสร้างไม่รับน้ำหนักบรรทุกใช้สำหรับผนังกันห้องที่ไม่ต้องรับ
น้ำหนักบรรทุก ผนังกันทางเดิน และใช้เป็นกระเบื้องทนไฟ การผลิตผลิตด้วยกระบวนการ
โคลนแข็ง

กระเบื้องพื้น (Structural-clay floor tile)

กระเบื้องพื้นดินโครงสร้างทำจากดิน ดินทนไฟ ดินดาล หรือสารผสมของดิน
ที่กล่าว ใช้กับการก่อสร้างคอนกรีตแบบ ribbad-slab ได้

กระเบื้องหลังคา (Roofing tile)

กระเบื้องหลังคา จะต้องมีรูปร่าง สม่ำเสมอ ปราศจากการงอ เพื่อมิให้หลังคาเกิด
การรั่วจึงจำเป็นต้องเลือกสรรดินด้วยความระมัดระวังไม่ให้ กระเบื้องเสียรูปได้ในระหว่างการ
เผากระเบื้องหลังคาผลิตโดยกระบวนการโคลนแข็งด้วยเครื่องจักรส่วาน เมื่อแห้งแล้วนำไป
เผาในเตาเผาแบบกระแสลมลง ปรกติกระเบื้องหลังคาได้รับการเผาจนเป็นอิฐแข็ง แต่บางที
เผาให้เป็นอิฐอ่อน เพื่อประโยชน์ในการเป็นฉนวน

สมบัติของอิฐและกระเบื้อง

ความดูดกลืนของอิฐ

ความดูดกลืนน้ำของอิฐมักจะถือเป็นเครื่องชี้ความคงทนของอิฐ การทดสอบความดูดกลืนของอิฐก่อสร้างปกติให้แช่อิฐในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง อีกวิธีหนึ่งให้อิฐแช่อยู่ในน้ำ ณ $60-90^{\circ}\text{F}$ ($15.5-30^{\circ}\text{C}$) (อุณหภูมิของห้อง) ให้น้ำเดือดภายใน 1 ชั่วโมง และให้เดือดอยู่เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นลง ณ อุณหภูมิของห้อง และชั่งน้ำหนัก (ดูข้อกำหนดมาตรฐานอิฐมอญท้ายบท)

สำหรับหน่วยอิฐที่ต้องมีความต้านทานทางเคมี ให้เดือดอยู่เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กระเบื้องดินโครงสร้างแสดงหน้า กระเบื้องผนัง กระเบื้องพื้นให้เดือดอยู่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ความแข็งแรงเบนของอิฐ

การทดสอบความแข็งแรงเบนกระทำได้ง่าย และให้ค่าประมาณของความแข็งแรงดึง โดยใช้โมดูลัสของการแตกหัก (modulus of rupture) การทดสอบและประสบการณ์ได้แสดงว่าสิ่งก่อสร้างอิฐก่อภายใต้ความเค้นอัดปกติจะเกิดจากการพัง และการไหลตามข้าง (lateral flow) ที่ติดตามมาของปูนก่อ (mortar) เป็นเหตุให้เกิดความเค้นดึงในอิฐและเบ้ารอยแตกเกิดขึ้นในสิ่งก่อสร้างอิฐก่อ ผิวแตกร้าวของอิฐมักเป็นเครื่องชี้ที่มีค่าให้เห็นถึงกระบวนการบดกับการผสมดินและการเผา

ความแข็งแรงเฉือนของอิฐ

ความแข็งแรงเฉือนของอิฐมีความสำคัญน้อยในทางปฏิบัติ ทั้งนี้เพราะการหาความแข็งแรงเฉือนที่แท้จริงกระทำได้ยาก ในการทดสอบจะมีแรงเบนเกิดขึ้นด้วย ซึ่งหมายถึงว่ามีแรงดึงและแรงอัดพร้อมกับแรงเฉือน ความแข็งแรงเฉือนของอิฐธรรมดา มีประมาณ 1,000-1,500 ปอนด์/ตารางนิ้ว (70-160 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)

โมดูลัสความยืดหยุ่นของอิฐ

โมดูลัสความยืดหยุ่นของอิฐมีค่าไม่คงที่ สมบัติยืดหยุ่นของอิฐซึ่งแสดงโดยเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของการทดสอบแรงอัดคล้ายคลึงกับคอนกรีตและปูนก่อมาก สำหรับช่วงน้ำหนักบรรทุกไม่เกิน 1 ใน 4 ของความแข็งแรงอัด โมดูลัสความยืดหยุ่นของอิฐธรรมดา มีค่าประมาณ 1,500,000-2,500,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว (106,000-176,000 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)

อิฐดินก่อสร้างและหน่วยอิฐตามความต้องการของสมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน
 ASTM Requirements for Clay Building Brick and Solid Masonry Units

ประเภท Designation	ความแข็งแรงอัดต่ำสุด (วางอิฐตามหน้ากว้าง) ปอนด์/นิ้ว ² Minimum Compressive Strength Brick Flatwise psi gross area		น้ำดูดกลืนต่ำสุด โดยเดือด 5 ชม.% Minimum Water Absorption by 5-hr. Boiling %		สัมประสิทธิ์การอิม ตัวสูงสุด** Maximum Saturation Coefficient	
	อิฐ 5 แผ่นเฉลี่ย Average of 5 Brick	อิฐแต่ละแผ่น Individual	อิฐ 5 แผ่น เฉลี่ย Average of 5 brick	อิฐแต่ละ แผ่น Individual	อิฐ 5 แผ่น เฉลี่ย Average of 5 brick	อิฐแต่ละ แผ่น Individual
	ชั้น Grade SW	3,000	2,500	17.0	20.0	0.78
ชั้น Grade MW	2,500	2,200	22.0	25.0	0.88	0.90
ชั้น Grade NW	1,500	1,250	ไม่จำกัด No limit	ไม่จำกัด No limit	ไม่จำกัด No limit	ไม่จำกัด No limit

* Grade SW - สำหรับใช้ในที่ที่ต้องการความต้านทานต่อปฏิกิริยาการเป็นน้ำแข็ง (frost action) สูงมาก และในกรณีที่มีน้ำอยู่เต็มจะแข็ง

Grade MW - สำหรับ (1) อิฐอยู่ในที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดน้ำแข็งแต่อิฐไม่มีน้ำอยู่เต็มหรือ (2) ในที่ที่ต้องการความต้านทานการเป็นน้ำแข็งปานกลางและไม่สม่ำเสมอ

Grade NW - สำหรับ (1) เป็นส่วนแกนภายในของสิ่งก่อสร้างอิฐก่อ (2) ในที่ที่ไม่มี
การเป็นน้ำแข็งเกิดขึ้นหรือ (3) ในที่ที่มีการเป็นน้ำแข็งแต่มีฝนตกเฉลี่ย
ปีละน้อยกว่า 20 นิ้ว (50 เซนติเมตร)

** สัมประสิทธิ์การอิมตัวคืออัตราส่วนของการดูดกลืนโดยการแช่ไว้ในน้ำเย็น 24 ชั่วโมงต่อ
การดูดกลืนในน้ำเดือด 5 ชั่วโมง

ภาคผนวก ๗

ระบบการจำแนกประเภทดิน

ความจำเป็นที่ต้องมีการจำแนกประเภทดิน ก็เพื่อให้เกิดความเข้าใจในสมบัติของดินอย่างคร่าวๆ ก่อนการคำนวณออกแบบและก่อสร้าง ฉะนั้นจึงมีข้อกำหนดการจำแนกประเภทของดินขึ้นไว้เพื่อให้ปฏิบัติตามเกณฑ์เดียวกัน

กรณีที่ต้องใช้การจำแนกดินนั้น มีดังนี้

- 1.1 ในการแสดงผลการเจาะดิน (การทำปุมแสดงชั้นดิน การทำแผนที่ดิน)
- 1.2 ในการพิจารณาหาความลาดของดินตัดหรือดินถม
- 1.3 ในการพิจารณาสมบัติของวัสดุ ว่าเป็นดินเดิมหรือเป็นดินถมซึ่งนำมาจากที่อื่น
- 1.4 ในการพิจารณาการขยายตัวและหดตัวของดิน
- 1.5 ในการเลือกวิธีการก่อสร้างและเครื่องจักรที่ใช้
- 1.6 ในการประเมินความสามารถในการทำงานของเครื่องมือก่อสร้างต่างๆ
- 1.7 ในการวางแผนตัดไหล่ทาง และการทำงานกำนังกันดิน

ตารางที่ 1.1 แสดงชื่อและระบบจำแนกดินประเภทดินเอกภพ(Unified Soil Classification System) ซึ่งใช้ระเบียบวิธีการจำแนกประเภทดินที่กล่าวมาแล้ว

ในกลุ่มดินประเภทเดียวกันมักมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกัน และหากใช้ประสบการณ์ที่ผ่านมาเข้าประกอบการพิจารณาตรวจสอบก็สามารถสรุปคุณสมบัติต่างๆของดินได้ ดังแสดงไว้ในตาราง 1.2 และ 1.3 ตารางเหล่านี้จะมีประโยชน์ต่อการตัดสินใจเกี่ยวกับการสำรวจดิน การคำนวณออกแบบ รวมถึงการดำเนินงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับดินได้อย่างถูกต้อง

นอกจากระบบการจำแนกดินแบบเอกภพแล้ว ยังมีการจำแนกดินระบบอื่นซึ่งเขียนไว้ในคู่มือหรือข้อกำหนดในการคำนวณออกแบบที่ใช้ในประเทศต่างๆ แต่เมื่อมีการกำหนดขนาดของเมล็ดดินและจำแนกประเภทดินออกเป็นกรวด, ทราย, ทรายแป้งและดินเหนียว ดังแสดงในรูป 1.1 ซึ่งอาจเรียกชื่อแตกต่างกันไปในบางประเทศ

ตารางที่ 1.1 ระบบการจำแนกประเภทดินเอกภาพ (ASTM D 2487 - 86 T)

การจำแนกประเภททั่วไป		เครื่องหมาย จำแนกประเภท	คำอธิบาย		เกณฑ์การจำแนกประเภท			
ดินมีผลทาง ค้ำงอขึ้นตะแกรง ขนาด 4.75 มม. มากกว่า 50 %	กรวดสะอาด	GW	กรวดหลายขนาดด้วยกัน, กรวดผสม ทราย, มีเม็ดละเอียดปนบ้าง หรือ ไม่มีเลย	GW, GP, SW, SP GM, GC, SM, SC ถ้าจำแนกประเภทไม่ได้โดยวิธีข้างต้น ให้ใช้ชื่อกลุ่มย่อย	$U_c = D_{60}/D_{10}$ มากกว่า 4 $U_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ มีค่า 1 - 3			
		GP	กรวดขนาดเดียว, กรวดผสมทราย, มีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มีเลย		ไม่เข้าเกณฑ์ประเภท GW			
		กรวดรวมทั้ง เม็ดละเอียด ด้วย	GM		กรวดปนทรายแป้ง, กรวด, ทราย และทรายแป้ง มีเม็ดขนาดเดียว ผสมปนกัน	จัดเกณฑ์เบอร์คือได้เส้น A หรือ I_p น้อยกว่า 4	เมื่อจัดเกณฑ์เบอร์คืออยู่เหนือเส้น A และ I_p มีค่าระหว่าง 4-7 ให้ ใช้เครื่องหมายจำแนกประเภท 2 ต่อไป	
			GC		กรวดปนดินเหนียว, กรวด, ทราย และดินเหนียว มีเม็ดขนาดเดียว ปนกัน	จัดเกณฑ์เบอร์คืออยู่เหนือ เส้น A และ I_p มากกว่า :		
	ผ่านตะแกรง ขนาด 4.75 มม. มากกว่า 50%	ทรายสะอาด	SW		ทรายหลายขนาดด้วยกัน ทรายปน กรวด มีเม็ดละเอียดปนบ้าง หรือ ไม่มีเลย	$U_c = D_{60}/D_{10}$ มากกว่า 6 $U_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ มีค่า 1 - 3		
			SP		ทรายขนาดเดียวกัน, ทรายปนกรวด มีเม็ดละเอียดปนบ้าง หรือไม่มีเลย	ไม่เข้าเกณฑ์ประเภท SW		
		ทราย รวมทั้ง เม็ดละเอียด ด้วย	SM		ทรายนทรายแป้ง มีเม็ดขนาด เดียวกัน	จัดเกณฑ์เบอร์คือได้เส้น A หรือ I_p น้อยกว่า 4	เมื่อจัดเกณฑ์เบอร์คืออยู่เหนือเส้น A และ I_p มีค่าระหว่าง 4-7 ให้ ใช้เครื่องหมายจำแนกประเภท 2 ต่อไป	
			SC		ทรายนดินเหนียว ทรายนดินเหนียว มีเม็ดขนาด เดียวกัน	จัดเกณฑ์เบอร์คือ อยู่เหนือเส้น A และ I_p มากกว่า 7		
		การจำแนกประเภทโดยวิธีอื่น: ทรายละเอียด มีค่าระหว่าง 74 μ น้อยกว่า 5% มีค่าระหว่าง 74 μ มากกว่า 12% มีค่าระหว่าง 74 μ ระหว่าง 5% - 12%						

ตารางที่ 1.1 (ต่อ)

การจำแนกประเภททั่วไป		เครื่องหมาย จำแนกประเภท	คำอธิบาย	เกณฑ์การจำแนกประเภท
ลินเม็ด ละเอียด ผ่าน ตะแกรง 75 μ มากกว่า 50%	ทรายแป้งและดินเหนียว LL \leq 50	ML	ทรายแป้งอินทรีย์, ทรายละเอียดมาก หิน-ฝุ่น ทรายละเอียดปนทรายแป้ง หรือดินเหนียว มีสภาพพลาสติกเล็กน้อย	<p>แผนภูมิสภาพพลาสติก</p> <p>สำหรับการจำแนกประเภท หยาบปานกลาง เน็ดละเอียด อยู่ในดินเม็ดละเอียด และ เม็ดหยาบ อิงจันเตอร์เบร็กอยู่ ในรูปเม็ดละเอียด หมายความว่าให้ใช้ เครื่องหมาย CL-MH และ OL ML และ OH</p> <p>Ip = 0.73 (wL - 20)</p> <p>จุดเหลว wL (%)</p>
		CL	ดินเหนียวอินทรีย์ มีสภาพพลาสติก ต่ำหรือปานกลาง ดินเหนียวปนกรวด หรือปนทราย หรือปนทรายแป้ง ดินเหนียวมีความหนืดเล็กน้อย	
		OL	ทรายแป้งอินทรีย์ และดินเหนียว ปนทรายแป้ง มีสภาพพลาสติกต่ำ	
	ทรายแป้งและดินเหนียว LL > 50	MH	ทรายแป้งอินทรีย์, ทรายละเอียดหรือ ทรายแป้งปนโกลนหรือดินเบา	
		CH	ดินเหนียวอินทรีย์ มีสภาพพลาสติก สูง, ดินเหนียวมีความหนืดสูง	
		OH	ดินเหนียวอินทรีย์ มีสภาพพลาสติกปาน กลาง หรือสูง	
ดินอินทรีย์สูง		Pt	พีต, โกลนสีดำ และดินอินทรีย์สูง อื่นๆ	แยกได้ด้วยวิธีการและการสัมผัส, ASTM · D 2488 - 66T

ตารางที่ 1.2 ระบบการจำแนกประเภทดินเอกภาพ (สำหรับดินถมและฐานราก)

การจำแนกประเภททั่วไป	เครื่องหมายจำแนกประเภท	คำอธิบาย	การใช้งานเบื้องต้น	สัมประสิทธิ์ของความชื้นได้ α (ซม./วินาที)	ลักษณะเฉพาะของกรวด	ความหนาแน่นแห้ง γ_d (กน/ลบม.)	การใช้งานฐานราก	การใช้งานป้องกันน้ำซึม
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
ดินเม็ดหยาบ	กรวด และ ดินปนกรวด	GW กรวดหรือกรวดผสมทราย มีหลายขนาดและกั้นมีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มีเลย	เสถียรมาก, ใช้ทำชั้นหรือทำนบตรงส่วนที่ให้น้ำซึมผ่านได้	$> 10^{-2}$	ดี, ใช้รูดแทรกเคอร์, รวดย่อยา, รวดคัดเหล็ก	2.00-2.16	วิธีสามารถรับแรงจรด	ทำแถบลดความเร็วของน้ำซึม
		GP กรวดหรือกรวดผสมทราย ขนาดเดียวกัน มีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มีเลย	เสถียรมาก, ใช้ทำผิวชั้นหรือทำนบ ในส่วนที่ให้น้ำซึมผ่านได้	$> 10^{-2}$	ดี, ใช้รูดแทรกเคอร์, รวดย่อยา, รวดคัดเหล็ก	1.84-2.00	วิธีสามารถรับแรงจรด	ทำแถบลดความเร็วของน้ำซึม
		GM กรวดปนทรายเป็ง กรวดปนทรายและทรายเป็งมีเม็ดขนาดเดียวกัน	เสถียรมาก, ไม่ค่อยเหมาะสมกับส่วนที่น้ำซึมได้ ใช้ทำแกนกันน้ำซึม หรืออุดดิน	$10^{-3} - 10^{-4}$	ดี, คือ ก้อนรวมอย่างเข้มงวด รวดย่อยา, รวดคัดและ	1.92-2.16	วิธีสามารถรับแรงจรด	ใช้สำหรับปล่อยลาดเขื่อนดินได้บ้าง บางครั้งไม่จำเป็น
		GC กรวดปนดินเหนียว, กรวด ทราย และดินเหนียว ปนกัน มีเม็ดขนาดเดียว	ค่อนข้างเสถียร ใช้ทำแกนกันน้ำซึม	$10^{-4} - 10^{-6}$	ดี, รวดย่อยา, รวดคัดและ	1.84-2.08	วิธีสามารถรับแรงจรด	ไม่จำเป็น
	ทราย และ ดินปนทราย	SW ทรายหยาบขนาดละเอียด, ทรายปนกรวด มีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มีเลย	เสถียรมาก ใช้ทำส่วนที่ให้น้ำซึมผ่านได้ แต่จะค่อยป้องกันความลาดของชั้น	$> 10^{-3}$	ดี, ใช้รูดแทรกเคอร์	1.76-2.08	วิธีสามารถรับแรงจรด	ใช้คลุมดินปล่อยเขื่อนดินเหนียว และปล่อยลาดเขื่อนดินได้บ้าง
		SP ทรายเม็ดขนาดเดียวกัน, ทรายปนกรวด มีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มีเลย	เสถียรมาก ใช้สำหรับชั้นที่มีความลาดไม่มาก	$> 10^{-3}$	ดี, ใช้รูดแทรกเคอร์	1.00-1.92	วิธีสามารถรับแรงจรดหรือไม่ขึ้นกับความหนาแน่น	ใช้คลุมดินปล่อยเขื่อนดินเหนียว และปล่อยลาดเขื่อนดินได้บ้าง
		SM ทรายนปนทรายเป็ง, ทรายนปนทรายเป็ง มีเม็ดขนาดเดียวกัน	ค่อนข้างเสถียร ไม่ค่อยเหมาะสมกับส่วนที่น้ำซึมได้ ใช้ทำแกนกันน้ำซึม	$10^{-3} - 10^{-6}$	ดี, คือ ก้อนรวมอย่างเข้มงวด รวดย่อยา, รวดคัดและ	1.76-2.00	วิธีสามารถรับแรงจรดหรือไม่ขึ้นกับความหนาแน่น	ใช้คลุมดินปล่อยเขื่อนดินเหนียว และปล่อยลาดเขื่อนดินได้บ้าง

ตารางที่ 1.3 (ต่อ)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
		u		ดีพอใช้ หรือดี	ไม่เหมาะสม	น้อยหรือมาก	น้อยหรือธรรมดา	ไม่ดีหรือไม่สามารถชี้มาได้	รุดตอยาง รอบคดเคี้ยว	1.8-2.08	10-20	5.5-8.3
		SC	ทรายปนดินเหนียว ทรายและดินเหนียวปนกัน	ดีพอใช้ หรือดี	ไม่เหมาะสม	น้อยหรือมาก	น้อยหรือธรรมดา	ไม่ดีหรือไม่สามารถชี้มาได้	รุดตอยาง, รอบคดเคี้ยว	1.8-2.08	10-20	5.5-8.3
ดินเหนียว	ทรายแป้ง และดินเหนียว	ML	ทรายแป้งเหนียวหรือ ทรายละเอียดมาก, หินปูนทรายละเอียดปนทราย แป้งหรือหินเหนียว ทรายแป้งปนดินเหนียว มีสภาพพลาสติกเล็กน้อย	ดีพอใช้ หรือไม่ดี	ไม่เหมาะสม	ธรรมดาหรือสูง	น้อยหรือธรรมดา	ดีหรือไม่ดี	รุดตอยาง, รอบคดเคี้ยว และ ความคุมความชื้น โทกทรงครั้น	1.80-2.00	5-15	2.8-5.5
		CL	ดินเหนียวเหนียวหรือ มีสภาพพลาสติกต่ำกว่าปกติ, ดินเหนียวปนทราย ดินเหนียวปนทราย ทราย ดินเหนียวปนทรายแป้ง ดินเหนียวมีความหนืดน้อย	ดีพอใช้ หรือไม่ดี	ไม่เหมาะสม	ธรรมดาหรือสูง	ธรรมดา	ไม่สามารถชี้มาได้	รุดตอยาง, รอบคดเคี้ยว	1.80-2.00	5-15	2.8-5.5
	เม็ดละเอียด	OL	ทรายแป้งเหนียวหรือ มีสภาพพลาสติกเล็กน้อย และดินเหนียวปนทรายแป้ง	ไม่ดี	ไม่เหมาะสม	ธรรมดาหรือสูง	ธรรมดาหรือสูง	ไม่ดี	รุดตอยาง, รอบคดเคี้ยว	1.41-1.54	4-8	2.8-5.5
		MH	ทรายแป้งเหนียวหรือ ทรายละเอียด หรือทรายปนทรายแป้ง มีไมกา หรือดินเบาผสม	ไม่ดี	ไม่เหมาะสม	ธรรมดาหรือสูง	สูง	ดีหรือใช้ไม่ได้	รอบคดเคี้ยว	1.25-1.60	4-8	2.8-5.5
		CH	ดินเหนียวเหนียวหรือ มีสภาพพลาสติกสูง ดินเหนียวมีความหนืดสูง	ไม่ดี	ไม่เหมาะสม	ธรรมดา	สูง	ไม่สามารถชี้มาได้	รอบคดเคี้ยว	1.44-1.78	3-5	1.4-2.8
	OH	ดินเหนียวเหนียวหรือ มีสภาพพลาสติกสูงกว่าปกติ ทรายแป้งปนหรือ	ไม่ดี หรือ เลวมาก	ไม่เหมาะสม	ธรรมดา	สูง	ไม่สามารถชี้มาได้	รอบคดเคี้ยว	1.24-1.55	3-5	1.4-2.8	
ดินอ่อนหรือสุร	Pt	หิด และดินอ่อนหรือสุรมาก	ไม่เหมาะสม	ไม่เหมาะสม	น้อย	สูงมาก	ดีพอใช้หรือไม่ดี	การบดเคี้ยวไม่ได้	-	-	-	

หมายเหตุ :

- ในช่อง (3) CM และ SM จำแนกประเภทย่อย เป็น s และ u เฉพาะกรณีงานทาง และสนามบิน การจำแนกประเภทย่อยนี้อาศัยขีดจำกัดเปอร์เซ็นต์ เช่น s (ยกตัวอย่าง CMs) ใช้ในกรณี $LL \leq 28$ และ $I_p \leq 4$, u ใช้ในกรณี $LL < 28$
- ค่าในช่อง (5) ใช้สำหรับชั้นดินเค็ม และชั้นรองพื้น ไม่รวมชั้นรองพื้นผิวลาดยาง
- ในช่อง (5) "ดีมาก" ใช้เฉพาะหินอ่อนมีคุณภาพดี
- ดินในช่อง (7) อยู่ในสภาพเอียงแข็ง ความภาวะที่อาจเกิดขึ้นได้
- ในช่อง (10) ถ้าเลือกปริมาณน้ำผสมและความหนาของชั้นดินได้ถูกต้อง รวมทั้งใช้เครื่องมือตามระบุไว้ บดอัดดินครบจำนวนครั้ง ก็จะให้ความหนาแน่นของดินที่โครงการ เนื่องจากแต่ละประเภทมีสมบัติต่างกัน จึงต้องใช้เครื่องมือบดอัดต่างกันบางกรณีก็ใช้เครื่องมือหลายชนิด บางกรณีจำเป็นต้องใช้เครื่องมือ 2 ชนิดร่วมกัน
 - วัสดุที่ชั้นรองพื้นหรือกรวด และวัสดุอื่น ๆ : ใช้รถบดล้อเหล็กในการบดอัดวัสดุบนเนื้อละเอียด สำหรับวัสดุอื่น แยกง่าย ใช้รถบดล้อยาง
 - การควบคุมสุดท้าย : สำหรับกรวดแต่ง งานดินครึ่งสุดท้าย สวมควรใช้รถบดล้อยาง กับดินทั่วไปและวัสดุอื่น ๆ ที่เอียงตรงแล้ว
 - ขนาดของเครื่องจักร : ในการสร้างสนามบิน ซึ่งต้องให้ความหนาแน่นสูงตามที่ต้องการ จะต้องใช้เครื่องกล ตามขนาดดังต่อไปนี้

รถแทรกเตอร์ดินตะเข็บ.....	น้ำหนักทั้งหมด 16 ตัน หรือมากกว่า
รุดตอยาง.....	น้ำหนักล้อ 7.5 ตัน หรือมากกว่า สำหรับวัสดุบางชนิด บางครั้งต้องใช้น้ำหนักล้อ 20 ตัน (ความดันสันตะเข็บประมาณ 4.5-10.5 กก./ซม. ²)
รถคดเคี้ยว.....	โดยทั่วไปใช้หน่วยความดันประมาณ 17.5 กก./ซม. ² (สำหรับพื้นที่ของดินเคี้ยว 40-80 ซม. ²)

 แต่วัสดุบางชนิด ถ้าจะให้ให้ความหนาแน่นตามที่ต้องการ จะต้องใช้หน่วยความดัน 45 กก./ซม.² พื้นที่ของดินเคี้ยวจะต้องมากกว่า 5% ของพื้นที่รอบคด
- ความหนาแน่นแห้งในช่อง (11) เป็นค่าขณะที่มีการบดอัด โดยใช้พลังงานการบดอัดตามระบบการจำแนกประเภทดินของ AASHTO ที่แก้ไขใหม่ โดยที่ปริมาณน้ำเหมาะสมที่สุด

Bureau of Soils USDA-1896	ดินเหนียว	ทรายแป้ง	ล.ม.	ล	ป	ช	กรวด					
			ทราย									
		0.005	0.060	0.250		2.000						
ASTM : D422-39	โคลลอยด์	ดินเหนียว	ทรายแป้ง	ล	ช	กรวด						
				ทราย								
JIS A 1204-50	โคลลอยด์	ดินเหนียว	ทรายแป้ง	ล	ช	กรวด						
		0.005	0.060	0.250		2.000						
MIT-31	ดินเหนียว	ล	ป	ช	ล	ป	ช	กรวด				
		ทรายแป้ง			ทราย							
DIN 4022-56	ดินเหนียว	ล	ป	ช	ล	ป	ช	ล	ป	ช		
		ทรายแป้ง			ทราย			กรวด		หิน		
BS 1377-61	ดินเหนียว	ล	ป	ช	ล	ป	ช	กรวด		หินมนเล็ก		
		ทรายแป้ง			ทราย							
		0.002	0.020	0.060	0.200	0.600	2.000	6.000	20.000	60.000	76.200	203.000
American Society for Engineering Education-47	ดินเหนียว	ล	ช	ล	ป	ช	ล	ป	ช	กรวด		
		ทรายแป้ง		ทราย			กรวด					
		0.020	0.074	0.250	0.600	2.000				76.200		
AASHO-49	ดินเหนียว-ทรายแป้ง		ล	ช	กรวด							
			ทราย									
ระบบดินเอกภาพ -53	ดินเหนียว	ทรายแป้ง	ล	ป	ช	ล	ช	กรวด		หินมนเล็ก	หินมนใหญ่	
			ทราย			กรวด						
อังกฤษ -57	ดินเหนียว	ทรายแป้ง	ล	ป	ช	กรวด		หินมนเล็ก	หินมนใหญ่			
			ทราย									
			0.074	0.210	0.420	0.600	2.000	2.410	4.760	19.100	76.200	203.000
ASTM : D422-61T	โคลลอยด์	ดินเหนียว	ทรายแป้ง	ล	ป	ช	กรวด		หินมนเล็ก	หินมนใหญ่		
				ทราย								
		0.005	0.074	0.420		2.000	4.760	76.200	305.000			
JIS A 1204 แก้ไขใหม่ -60	โคลลอยด์	ดินเหนียว	ทรายแป้ง	ล	ช	กรวด						
				ทราย								
งานทาง -67	โคลลอยด์	ดินเหนียว	ทรายแป้ง	ล	ป	ช	กรวด					
				ทราย								
		0.005	0.074	0.210	0.420	0.600	2.000	75.000				

จุดแบ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
ที่สำคัญของเม็ดดิน

0.074 มม. ตะแกรง # 200
0.420 มม. ตะแกรง # 40
4.76 มม. ตะแกรง # 4

รูปที่ 1.1 การจำแนกประเภทดินตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (หน่วยเป็น มม.)
(ล.ม. : ละเอียดยมาก, ล : ละเอียดย, ป : ปานกลาง, ช : หยาบ)

ภาคผนวก ๗

การจำแนกดินทางวิศวกรรม

ดิน เป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นด้วยสิ่งต่าง ๆ หลายอย่าง เช่น กรวด, ทราย, ดินเหนียว, อินทรีสาร เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของหินต้นกำเนิด, การกัดกร่อนผุพัง, การพัดพา และการตกตะกอนทับถม เพื่อที่จะจัดหมวดหมู่ของดินที่มีคุณสมบัติเฉพาะคล้ายกันเข้าอยู่ในพวกเดียวกัน ความรัดกุมประสงค์ในการใช้งาน การจำแนกประเภทของดินจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

เนื่องจากมีผู้เกี่ยวข้องกับดินอยู่หลายสาขาด้วยกัน การจำแนกประเภทดินจึงแตกต่างกันออกไป แล้วแต่วัตถุประสงค์ในการใช้งานในแต่ละสาขา เช่น ทางด้านเกษตรศาสตร์จะจำแนกดินตามความอุดมสมบูรณ์ของธาตุสารที่พืชจะนำไปใช้ประโยชน์ ทางด้านธรณีวิทยาอาศัยลักษณะหินต้นกำเนิดและการกัดกร่อนผุพัง เป็นปัจจัยในการจำแนก สำหรับทางวิศวกรรมโยธาพิจารณาคุณสมบัติทางฟิสิกส์และกลศาสตร์ของดินเป็นหลัก เช่น ขนาดของ เม็ดดิน, แรงยึดเกาะของมวลดิน เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับประโยชน์ใช้สอยทางวิศวกรรมแต่ละหมวดหมู่ของดินที่จัดเข้าไว้ จะมีอักษรย่อเฉพาะซึ่งจะ เป็นที่เข้าใจได้โดยง่ายในหมู่วิศวกร หรือบุคคลอื่นที่เกี่ยวข้อง

ในวงการวิศวกรรมโยธา การจำแนกดินมีหลายระบบขึ้นอยู่กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและประโยชน์ใช้สอย เช่น งานด้านถนนใช้ระบบ AASHTO Classification ซึ่งจัดแบ่งดินตามความเหมาะสมในการใช้ เป็นวัสดุก่อสร้างถนน งานสนามบิน ใช้ระบบของ FAA Classification และระบบ Unified Soil Classification ซึ่งใช้กับงานวิศวกรรมทั่ว ๆ ไปและนิยมแพร่หลายกว่าระบบอื่น ๆ

การบอกลักษณะของดินสามารถนำมาประกอบในการจำแนกดินได้

การบอกลักษณะของดิน (Soil identification)

การบอกลักษณะของดิน ใช้สิ่ง เกณฑ์ด้วยตา หรือจากการสัมผัส ซึ่งสามารถแยกออก
ได้ดังนี้

1. สี (Colour)
2. ลักษณะ เนื้อดิน, ผิวดิน (Texture)
3. ความชื้น (Moisture)
4. ความอ่อนแข็ง

1. สีของดิน ดูจากนำดินมาเปรียบเทียบกับ Colour chart ถ้าไม่มีดูได้

ด้วยตา

2. ลักษณะ เนื้อดิน ได้แก่

กรวด (Gravel) ประกอบด้วยดิน เม็ดหยาบ ไม่มีความ เชื่อมแน่น ขนาดเล็กกว่า
3 นิ้ว ใดกว่า 4.76 มม.

ทราย (Sand) เม็เล็กกว่ากรวด ไม่มีความ เชื่อมแน่น เมื่อแห้ง เม็ดเป็นเหลี่ยม
ผิวรู้สึกสาก ๆ มีอ ขนาดเล็กกว่า 4.76 มม.

ทรายปน (Silt) ประกอบด้วยส่วนที่หยาบของดิน เม็ดละเอียด โดยปกติไม่สา-
มารถจะบอกได้ด้วยการดูชัดเจนเพราะขนาดเล็ก ต้องอาศัย dry strength โดยธรรมชาติ
แล้ว Silt มี dry strength ค่ำถึงค่ำมาก มีปฏิกิริยารวดเร็วคือ dilatancy test มี
ความขู่ยเมื่อกลึงเป็นเส้นเล็ก ๆ ขนาดประมาณ $\frac{1}{8}$ นิ้ว กดให้แตกได้ง่ายเมื่อแห้งสนิท

ดินเหนียว (Clay) ประกอบด้วยส่วนละเอียดของดิน เม็ดละเอียด มี dry
strength สูงถึงสูงมาก ไม่มีปฏิกิริยาคือ dilatancy สามารถกลึงเป็นเส้นเล็ก ๆ ได้โดย
ไม่มีการแตกร้าว และ เมื่อแห้งสนิทจะแข็ง

ส่วนคละที่ดี (Well graded) ประกอบด้วยตัวแทนของตัวอย่างดินหลาย ๆ
ขนาดคละกันไปอย่างไม่ขาดค่อนจากหยาบที่สุดถึงละเอียดที่สุด

ส่วนละเอียดสม่ำเสมอ (Uniform) หรือส่วนละเอียดเลว (Poorly graded) ดินที่มีส่วนละเอียดประเภทนี้ประกอบด้วยส่วนย่อย ๆ ที่มีขนาดเกือบเท่ากันหมด

ดินที่มีสารอินทรีย์ (Organic Soil Materials) โดยปกติจะมีสีน้ำตาลเข้มหรือดำ โดยทั่วไปจะมีกลิ่นของพืชและสิ่งหุ้่ง

Dry strength เป็นการแยกมวลดินออกจากกันด้วยนิ้วหัวแม่มือหรือนิ้วชี้ ดินที่ใช้ทดสอบควรมีขนาดประมาณ $\frac{3}{8} \times \frac{3}{8} \times 1$ " แล้วใช้นิ้วมือกด ถ้าไม่แตกจากกันเลยแสดงว่าแข็งมาก ถ้าแตกเบา ๆ ก็แตกออกจากกันแสดงว่าความแข็งแรงต่ำมาก

Dilatancy test ทดสอบโดยการผสมดินกับน้ำให้เข้ากันอย่างดี มีความชื้นเหลวพอสมควร และปริมาณไม่มากนัก การผสมให้ผสมในอุ้งมือแล้วเหยียดฝ่ามือออกปาดผิวดินให้เรียบ สังเกตปริมาณน้ำที่อยู่บนผิวดินเมื่อเกาะหลังมือที่มีดินอยู่ด้วยมืออีกข้างหนึ่งเบาๆ ถ้าดินมีปฏิกิริยาต่อการทดสอบ น้ำจะไหลซึ่งขึ้นจากข้างล่างสู่ข้างบนโดยผิวหน้าดินจะมีความวาววับของน้ำปรากฏให้เห็นชัด แต่ถ้ากำมือเข้าให้แน่นแล้วเหยียดออกอีกครั้งความวาววับจะหายไป ปฏิกิริยานี้สามารถแยกได้ว่าดินเม็ดใหญ่หรือเล็ก ถ้าเม็ดเล็กจะเกิดช้า การทดลองนี้ใช้กับ Silt และ Clay เท่านั้น

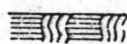
3. ความชื้นในดิน แบ่งออกเป็น แห้ง ชื้น และเปียก (dry, moist, wet)

ดินทรายเห็นได้ชัด ดินเหนียวต้องดูจาก

LI < 0.2 ดินแห้ง

0.2 < LI < 0.5 ดินชื้น

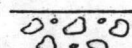
LI > 0.5 ดินเปียก



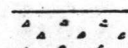
Bedrock



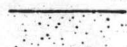
Broken rock



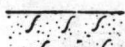
Boulders



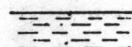
Gravel



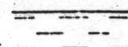
Sand



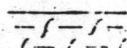
Silt



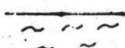
Stiff clay



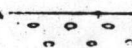
Soft clay



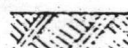
Silt and clay



Mud



Peat



Loam

Symbols for soils.

4. ความอ่อนแข็ง ปกติใช้กับดินเหนียว

ก. ดินเหนียว

ความอ่อนแข็ง	ทดลองการสัมผัส	STP blow/ft	Cohesion T/ft ²
อ่อนมาก (Very Soft)	มือกดลงได้ง่าย	0 - 2	0.00 - 0.25
อ่อน (Soft)	กดเบา ๆ ด้วยหัวแม่มือ	2 - 4	0.25 - 0.50
แน่น (Firm)	กดด้วยหัวแม่มือ	4 - 8	0.50 - 1.0
เหนียวแน่น (Stiff)	กดแรง ๆ ด้วยหัวแม่มือ	8 - 16	1.0 - 2.0
เหนียวแน่น (Very Stiff)	ใช้เล็บหัวแม่มือจิกได้	16 - 32	2.0 - 4.0
แข็ง (Hard)	เอาเล็บจิกได้	>32	4.0

ข. ถ้าเป็นดินทราย

ความแน่น	DR % Relative Density	STP blow/ft
ร่วนมาก (Very loose)	0 - 15	0 - 4
ร่วน (Loose)	15 - 35	4 - 10
ปานกลาง (Medium)	35 - 65	10 - 30
แน่น (Dense)	65 - 85	30 - 50
แน่นมาก (Very Dense)	85 - 100	มากกว่า 50

5. ส่วนประกอบอื่น เช่น ปริมาณดินที่ปนทรายมี 35 - 50% some มี 20 - 35% Trace to some 10 - 20% และ Trace ประมาณ 1 - 10% การบอก ให้บอก ดินชนิดที่น้อยกว่าอยู่ข้างหน้าเป็นชื่อยานาม เช่น Snady clay

6. การบอกชั้นต่าง ๆ ของดิน บอกด้วยสัญลักษณ์

การจำแนกดินอาศัยข้อมูลจากการทดลอง

การกระจายของเม็ดดิน (Grain size distribution)

การกระจายของเม็ดดิน เป็นส่วนสำคัญอย่างมากสำหรับช่วยในการจำแนกดินระบบต่าง ๆ จึงได้มีการคิดเพื่อวัดขนาดของเม็ดดิน เนื่องจากรูปร่างของเม็ดดินไม่แน่นอน วิธีที่จะวัดขนาดที่สมบูรณ์ที่สุดคือให้เม็ดดินผ่านช่องบอขนขนาดกว้างยาว จึงได้มีผู้ประดิษฐ์ตะแกรง แต่สำหรับเม็ดดินที่มีขนาดเล็กมากไม่สามารถจะวัดด้วยตะแกรงได้ ต้องอาศัยความเร็วการตกตะกอนของเม็ดดินในของเหลว ขนาดที่วัดได้ทั้งสองวิธีนี้เป็น Equivalent Diameter การจำแนกโดยระบบ Unified Soil Classification

ใช้อักษรย่อ 2 ตัว ทำให้จดจำง่ายและมีความหมายในตัวเอง เช่น G = Gravel (กรวด), S = Sand (ทราย), M = Silt (ดินเหนียว), C = Clay (ดินเหนียว), W = Well Graded (เม็ดละเอียด), P = Poorly Grade (เม็ดไม่ละเอียด), H = High Liquid Limit (L.L. มีค่าสูง), L = Low Liquid Limit (L.L. มีค่าต่ำ) หรือ O = Organic (ดินมีอินทรียสารปนมาก)

ขั้นตอนในการจำแนกอาจทำได้ดังนี้

1. แบ่งตามลักษณะขนาดเม็ดดิน เป็นพวกเม็ดทราย ได้แก่ กรวด (Gravel) และทราย (Sand) และพวกเม็ดละเอียด ได้แก่ ดินเหนียว (Clay) และดินทราย (Silt)
2. แบ่งย่อยตามลักษณะการกระจายของเม็ด สำหรับพวกเม็ดทราย เป็นพวกที่เม็ดละเอียดหลายขนาด (Well Graded) และเม็ดไม่ละเอียด เนื่องจากมีเม็ดขนาดเดียวกันมากหรือขนาดเม็ดขนาดช่วง (Poorly Grade)
3. แบ่งย่อยตามค่า Atterberg's Limits สำหรับพวกเม็ดละเอียด เรียกว่า Plasticity เช่น พวกมีค่า L.L. และ P.I. สูง เรียกว่า High Liquid Limit เป็นต้น

เมื่อถึงขั้นสุดท้ายจะมีอักษรย่อแทน 2 ตัว (ในกรณีถ้าถึงใช้ 4 ตัว) เช่น CH, GW, SP หรือ GM-GC, ML-CL



การจำแนกโดยระบบ AASHTO Classification

ใช้อักษรย่อจาก A-1 ถึง A-7 โดยที่เรียงลำดับจากความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุก่อสร้างทาง คือ A-1 ถึง A-3 เหมาะสมมาก ส่วน A-4 ถึง A-7 พอใช้ถึงใช้ไม่ได้ นอกจากนี้ยังมีการแบ่งย่อยลงไปอีกสำหรับ กรู๊ป A-1, A-2, A-7 เช่น A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-7, A-7-5 เป็นต้น

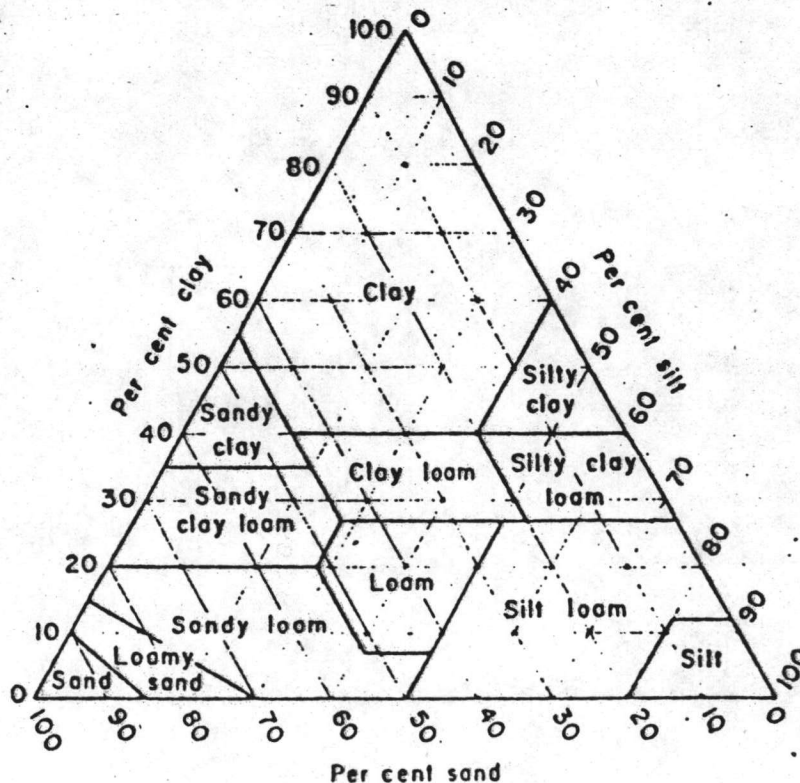
ขั้นตอนในการจำแนกอาจทำได้ดังนี้

1. แบ่งตามการกระจายของเม็ด
2. แบ่งตามค่า Atterberg's Limits
3. แบ่งตามค่า Group Index (G.I.)

เมื่อถึงขั้นสุดท้ายจะมีอักษรย่อ 2 หรือ 3 ตัว และมีวงเล็บค้อย้ายด้วยค่า Group Index เช่น

การจำแนกดินระบบ Unified และระบบ AASHTO ดูรายละเอียดภาคการทดลอง การจำแนกดินโดยใช้ตารางสามเหลี่ยม

การจำแนกดินจากตารางสามเหลี่ยม ใช้กับงานดินทางค้ำเกณฑ์กรรม โดยที่มีดินเบื้องต้นอยู่ 3 ชนิด คือ ทราย ทรายปน และดินเหนียว (Sand, Silt และ Clay) 3 ชนิดรวมกันได้ 100 % การใช้ตารางนี้ เขียน % ของทั้งสามชนิดตามหัวลูกศรชี้จุดจะพบกัน อ่านชื่อดินตามนั้น เช่น ทราย 43% Silt 44% Clay 13% จากตารางข้างล่างจะได้ดิน loam



คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

ความซึมได้ (Permeability)

ความซึมได้เป็นคุณสมบัติของดินที่ยอมให้น้ำไหลซึมผ่านระหว่างช่องว่างของเม็ดดิน การไหลซึมผ่านของน้ำจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดดิน ดินจำพวก กรวด ทราย น้ำจะไหลซึมผ่านได้เร็ว ทรายป่นและดินเหนียวน้ำไหลซึมผ่านได้ช้า การไหลซึมผ่านของน้ำเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของดิน ที่เกี่ยวกับการหาอัตราการยุบตัวของดินชั้นต่าง ๆ ปริมาณน้ำไหลซึมผ่าน เชื่อมความมั่นคงของความลาดเอียงระดับน้ำใต้ดิน และการระบายน้ำ

ปริมาณน้ำไหลผ่านมวลดิน คำนวณได้โดยอาศัยกฎของ Darcy's คือปริมาณน้ำที่ไหลผ่านมวลดิน จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับ Hydraulic gradient.

$$q = KiA$$

$$\text{or } v = \frac{q}{A} = Ki$$

- เมื่อ q = ปริมาณน้ำในหนึ่งหน่วยเวลา Q/t
 A = พื้นที่หน้าตัดที่น้ำไหลผ่าน
 i = Hydraulic gradient มีค่า = ผลต่างระดับน้ำต่อระยะทางที่น้ำไหลผ่าน $\left(\frac{h}{L}\right)$
 h = เป็นผลต่างความสูงของน้ำแต่ละด้าน
 L = ความหนาที่น้ำไหลผ่าน
 t = เป็นเวลาที่น้ำไหลผ่าน
 K = สัมประสิทธิ์ของความซึมได้ Darcy's Coefficient of Permeability

ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความหนืดของน้ำ
 มาตรฐานที่ 20°C

$$K_{20^{\circ}\text{C}} = KT \frac{\mu^Y}{\mu_{20^{\circ}\text{C}}}$$

สัมประสิทธิ์ของความชื้นได้ที่อุณหภูมิใด จะ เปลี่ยนไป เทียบกับที่อุณหภูมิมาตรฐาน

ดังนี้

$$K_{20^{\circ}\text{C}} = K_T \frac{\mu_T}{\mu_{20^{\circ}\text{C}}}$$

เมื่อ $K_{20^{\circ}\text{C}}$ = สัมประสิทธิ์ความชื้นได้ที่ 20°C

K_T = สัมประสิทธิ์ความชื้นได้ที่ $T^{\circ}\text{C}$

μ_T = ความหนืดของน้ำที่ $T^{\circ}\text{C}$

$\mu_{20^{\circ}\text{C}}$ = ความหนืดของน้ำที่ 20°C มีค่า = 10.09 มิลลิพอยส์

ตาราง 1: ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้

ชนิดของดิน	สัมประสิทธิ์ความชื้นได้ ซม./วินาที
กรวด	$1 - 10^{+2}$ Very good Drainage
ทราย	$1 - 10^{-3}$ Good to poor Drainage
ทรายเม็ดละเอียด	$10^{-3} - 10^{-5}$ Poor Drainage
ทรายบ่น	$10^{-5} - 10^{-7}$ Poor Drainage
ดินเหนียว	น้อยกว่า 10^{-7} Impervious

กำลังของดิน (Soil Strength)

กำลังของวัสดุแต่ละชนิดจะมีการเปลี่ยนแปลง และมีค่าแตกต่างกัน ในการวัดได้มาก วัสดุบางชนิดอาจจะถูกกำหนดคุณลักษณะด้วยจุดคลาก (Yield Point) หรือกำลังดึงประลัย (Tensile strength) เช่น เหล็ก ในขณะที่วัสดุพวกคอนกรีตจะกำหนดคุณลักษณะจากกำลังกดประลัย (Compressive strength) ซึ่งค่าที่ได้จะมีการแปรเปลี่ยนมากกว่า เหล็ก ทั้งนี้เพราะกำลังกดประลัยของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบในมวลคอนกรีต และความสมบูรณ์ของขบวนการผลิต

สำหรับดินยกเว้นที่บดอัด ทัวไปจะคำนึงถึงดินที่เป็นอยู่เองตามธรรมชาติ ซึ่งไม่ได้ถูกประกอบหรือผลิตขึ้นมาเหมือนวัสดุอื่น ๆ จึงทำให้คุณสมบัติของดินนั้นมีการเปลี่ยนแปลงได้มาก ดังนั้นในการนำดินมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างจึงต้องมีการศึกษาคุณสมบัติของดินโดยเฉพาะทางด้านกำลังรับแรงเฉือน (Shear strength) เป็นกรณี ๆ ไป เพื่อใช้กำหนดวิธีการออกแบบและการทำงานให้เหมาะสมและถูกต้องที่สุด

โดยทั่วไปการทดสอบหาค่ากำลังของดิน จะเป็นการหาค่ากำลังของดินภายใต้สภาวะหนึ่ง ๆ เมื่อดินถูกนำหนักกระทำจนถึงจุดวิบัติ รูปแสดงตัวอย่างการพิจารณาหาค่ากำลังดิน 1 ตัวอย่าง ซึ่งจะได้ Mohr circle 1 วง จากการทดสอบหลาย ๆ ตัวอย่างจะทำให้สามารถหา strength envelope ได้ สำหรับ Strength parameters ที่จะอธิบายสมการเส้นตรงของ strength envelope นี้ได้แก่ค่าแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) และมุมเสียดทานภายใน (Angle, of internal friction) โดยมีความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงเฉือน (Shear strength) ดังนี้

$$S = C + p \tan \phi$$

โดยที่	S	=	กำลังรับแรงเฉือนของดิน
	C	=	แรงยึดเหนี่ยว
	p	=	หน่วยแรงกดอัด
	ϕ	=	มุมเสียดทานภายใน

กำลังของดินมวลหยาบ (Strength of Sand and Gravel)

สำหรับดินมวลหยาบพวกทรายและกรวดซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesionless materials) ดังนั้นค่า C ตามสมการ $S = C + p \tan \phi$ จะเท่ากับศูนย์ กล่าวคือ เส้นตรงของ strength envelope จะผ่านจุด origin ดังนั้นกำลังของดินพวกนี้จึงขึ้นอยู่กับมุมเสียดทานภายในและแรงกดที่กระทำ

ในกรณีของทรายที่ชื้นจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวปรากฏ (Apparent cohesion) ขึ้น เนื่องจากแรงดึงผิวของน้ำในช่องว่าง รูปที่แสดงรูปตัดของทรายชื้นซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นของแข็ง น้ำและอากาศ ที่ผิวสัมผัสระหว่างอากาศและน้ำจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง แรงดึงผิวที่เกิดตามผิวสัมผัสจะทำให้เกิดแรงดึงระหว่างเม็ดทราย (Intergranular force) ยังผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวขึ้น ในทรายชื้น ในขณะที่ทรายแห้งหรือทรายที่อิ่มตัวด้วยน้ำจะไม่มีผิวสัมผัสระหว่างน้ำและอากาศ ดังนั้นจะไม่เกิดแรงยึดเหนี่ยวปรากฏขึ้น

กำลังของดินพวกกรวดและทรายนี้เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทาน และการยึดเกาะกันระหว่างเม็ดดินซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปร่างลักษณะ ขนาด ปริมาตรมวลละเอียดและองค์ประกอบอื่น ๆ เป็นต้น โดยเฉพาะค่าความหนาแน่นของดินจะถือเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่จะมีผลต่อกำลังของดินชนิดนี้ โดยทั่วไปค่ามุมเสียดทานภายในของทรายและกรวดจะมีค่าระหว่าง 28° ถึง 45° ขึ้นอยู่กับสภาพและสถานะของดิน จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างโดยเฉพาะในด้านการรับกำลัง

กำลังของดินเหนียว (Strength of Clay)

เนื่องจากดินเหนียวเป็นดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว ระหว่างอนุภาคของดินจึงมีกำลังที่จะรับแรงได้ถึงแม้ค่า normal pressure (p) มีค่าเท่ากับศูนย์โดยมีลักษณะของ Strength envelope ตามรูปที่ 5.1 ค่าความชันซึ่ง Strength envelope นี้จะขึ้นอยู่กับสถานะและลักษณะการไหลของน้ำออกจากมวลดินขณะที่ถูกน้ำหนักกระทำ ในกรณีที่มีน้ำหนักกระทำในช่วงระยะเวลาสั้น เช่นในระหว่างการก่อสร้าง ค่าความชันของ Strength envelope จะมีค่าเกือบเท่ากับศูนย์นั่นคือกำลังของดินจะขึ้นอยู่กับค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคดิน ในกรณีที่มีมุมเสียดทานภายในมีค่าเท่ากับศูนย์ ($\phi = 0$) ค่า $P_1 - P_3$ ตามรูปที่ 5.2(b) ที่จุดวิกฤติจะมีค่าเท่ากับ $2C$ ซึ่งการทดลองที่ง่ายและสะดวกที่สุดสำหรับการหา กำลังของดิน ในกรณีนี้คือ การทดสอบแบบ Unconfined compression (ASTM D2166) ซึ่งค่า P_3 จะเท่ากับศูนย์ ค่า Unconfined strength จะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำในมวลดิน รวมทั้งค่า Plastic Limit และ Liquid Limit ของดิน ตารางแสดงค่า Unconfined compressive strength ของดินชนิดต่าง ๆ

ดินเหนียวที่มีลักษณะ stiff จนถึง hard ส่วนใหญ่จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาในระหว่างการก่อสร้าง ส่วนดินเหนียวที่มีลักษณะ very soft จนถึง medium มักจะเกิดปัญหาทางด้านวิศวกรรม

ตารางแสดงกำลังของดิน เทนิยวสภาพต่าง ๆ

Consistency	Unconfined Compressive Strength, q_u (T/ft ²)	Cohesive Strength C (T/ft ²)
Very soft	น้อยกว่า 0.25	น้อยกว่า 0.12
Soft	0.25 - 0.25	0.12 - 0.12
Medium (firm)	0.50 - 1.0	0.25 - 0.50
Stiff	1.0 - 2.0	0.50 - 1.0
Very stiff	2.0 - 4.0	1.0 - 2.0
Hard	มากกว่า 4.0	มากกว่า 2.0

การยุบอัดตัว (Compressibility)

เมื่อดินแบกรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น จะเกิดการยุบตัวทำให้ปริมาตรลดลง น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นอาจ เนื่องจากน้ำหนักของฐานรากโครงสร้าง ค้นดิน หรือการลดระดับน้ำใต้ดิน เป็นต้น ในกรณีที่ดินแบกรับน้ำหนักโครงสร้างและมีการยุบอัดตัวมากอาจทำให้โครงสร้างทรุดตัวเกิดความเสียหายได้ ดินบางชนิดอาจเกิดการยุบอัดตัวมากภายใต้น้ำหนักบรรทุกในขณะที่ดินบางชนิดอาจเกิดการยุบอัดตัวน้อย ถ้าทราบค่าการยุบอัดตัวของดินและน้ำหนักที่กระทำก็สามารถประมาณค่าการทรุดตัวที่จะเกิดขึ้นได้ ซึ่งจะทำให้การออกแบบและการดำเนินงานระหว่างการก่อสร้างเป็นไปอย่างถูกต้อง

สาเหตุการยุบอัดตัวของดินสืบเนื่องมาจาก

- ก. การอัดตัวของส่วนที่เป็นของแข็ง
- ข. การไล่น้ำและอากาศออกจากช่องว่าง

ส่วนที่เป็นของแข็งและน้ำในช่องว่างถือว่าไม่สามารถจะอัดตัวได้ และไม่มีผลในการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ดังนั้น ปริมาตรที่ลดลงจึงสืบเนื่องมาจากการ เปลี่ยนตำแหน่งของส่วนที่เป็นของแข็งโดยการกลิ้ง (rolling) หรือ การไถล (sliding) และการไล่น้ำหรืออากาศออกจากช่องว่างภายในมวลดิน ความสามารถในการอัดตัวของดินขึ้นกับความแข็งแกร่งของโครงสร้างดิน ซึ่งเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคและแรงที่ยึดเกาะระหว่างกัน

เมื่อดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำได้รับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น เริ่มแรกน้ำจะเป็นตัวรับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด เพราะถือว่าน้ำไม่สามารถอัดตัวได้ (Incompressible) เมื่อเทียบกับโครงสร้าดิน ถ้าปล่อยให้ น้ำไหลออกได้บริเวณของมวลดินจะลดลง น้ำหนักจะค่อย ๆ ถ่ายให้โครงสร้าดิน เป็นตัวรับจนในที่สุดโครงสร้าดินจะรับน้ำหนักทั้งหมด ขบวนการนี้เรียกว่า "การยุบตัว" (Consolidation)

ขบวนการยุบอัดตัวสามารถแบ่งออก 3 ขั้นตอน

1. Immediate (Initial) consolidation เป็นการยุบตัวเริ่มแรก ขณะก่อสร้างจนกระทั่งการก่อสร้างสิ้นสุด เกิดได้เนื่องจากการยุบตัวในช่วง Elastic ของดิน

2. การยุบอัดตัวขั้นต้น (Primary Consolidation) เกิดขึ้นตั้งแต่เมื่อดินเริ่มได้รับน้ำหนัก น้ำจะเป็นตัวรับน้ำหนักโดยเกิดเป็นความดันน้ำในช่องว่างที่เกิน (excess pore water pressure) เมื่อปล่อยให้ น้ำไหลออกได้แล้วความดันน้ำจะลดลง โครงสร้าดินจะเป็นตัวรับน้ำหนักเพิ่มขึ้น การยุบอัดตัวในขั้นตอนนี้จะสิ้นสุดเมื่อความดันน้ำในช่องว่างที่เกิดลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อมีน้ำหนักกดทับ อัตราการเปลี่ยนแปลง ปริมาตรดินจะขึ้นอยู่กับค่าการไหลซึมผ่านของน้ำ (permeability) การอัดตัวของดิน Compressibility และระยะทางที่น้ำไหลออก

3. การยุบอัดตัวขั้นที่สอง (Secondary Consolidation หรือ Creep) เกิดขึ้นหลังจากการยุบอัดตัวในขั้นต้นเสร็จสิ้นแล้ว กล่าวคือ ความดันน้ำในช่องว่างที่เกินลดลงหมดแล้ว แต่การยุบตัวยังคงมีต่อไป ซึ่งโดยทั่วไปอาจไม่คำนึงถึงยกเว้นพวก highly organic หรือ peaty soils

การทรุดตัวของดิน 3 แบบ ผลรวมของทั้งหมดจะ เป็นการทรุดตัวและสามารถแทนค่าสมการดังนี้

$$S = S_i + S_c + S_s$$

โดยที่ S = การทรุดตัวรวมทั้งหมด

S_i = การทรุดตัวทันที (Immediate Settlement)

S_c = การทรุดตัว เนื่องจากการอัดตัวของดิน
Primary Consolidation Settlement

S_s = การทรุดตัวเนื่องจากการกรืบ (Creep) คิวของดิน
(Secondary Consolidation)

ดินเหนียวต่างชนิดกันจะมีการทรุดตัวต่างกัน เช่น กรณีที่ดินเหนียวอึดตัว จะมีการทรุดตัวแบบ S_c ส่วนใหญ่ แต่ทรายจะมีการทรุดตัวแบบ S_1 เห็นได้ชัดมาก

การยุบอัดตัวของดิน เมื่อขบวนภาวะ เนื่องจากการที่น้ำถูกขับออกจากช่องว่างภายในมวลดิน หลังจากนั้น จึง เป็นขบวนการที่ขึ้นอยู่กับระยะเวลา กล่าวคือ จะไม่เกิดขึ้นทันทีทันใดแต่จะเกิดช้า ๆ อัตราการยุบอัดตัวจะขึ้นอยู่กับค่าความชื้นไคยของดิน และลักษณะของดินรอมข้างที่จะเอื้ออำนวยต่อการระบายน้ำออกจากมวลดิน ถ้าเป็นทรายซึ่งมีค่าความชื้นไคยสูง การระบายน้ำจะเกิดขึ้นทันทีทันใด ในขณะที่ดินเหนียวขบวนภาวะการยุบอัดตัวอาจใช้เวลา เป็น เดือนหรือปี

ประวัติผู้เขียน

นายเฉลิมเดช เฉลิมลาภอักษร เกิดเมื่อวันที่ 2 เมษายน พ.ศ. 2504 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาระดับมัธยม จากโรงเรียนกรุงเทพคริสเตียนวิทยาลัย กรุงเทพฯ แล้วเข้าศึกษาต่อในคณะวิทยาศาสตร์และอักษรศาสตร์ (ปัจจุบันได้เปลี่ยนเป็นคณะวิทยาศาสตร์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ได้รับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาชีววิทยา (รังสีประยุกต์และไอโซโทป) ในปีพ.ศ. 2526 แล้วเข้าศึกษาต่อที่ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในเวลาต่อมา

