



WhitePaper: AO23 Poly(N-isopropylacrylamide-co-acrylamide) viscosity properties

July 23, 2015

Introduction

For temperature sensitive polymers knowing viscosity changes at low temperature has value for 3D printing applications.

Method

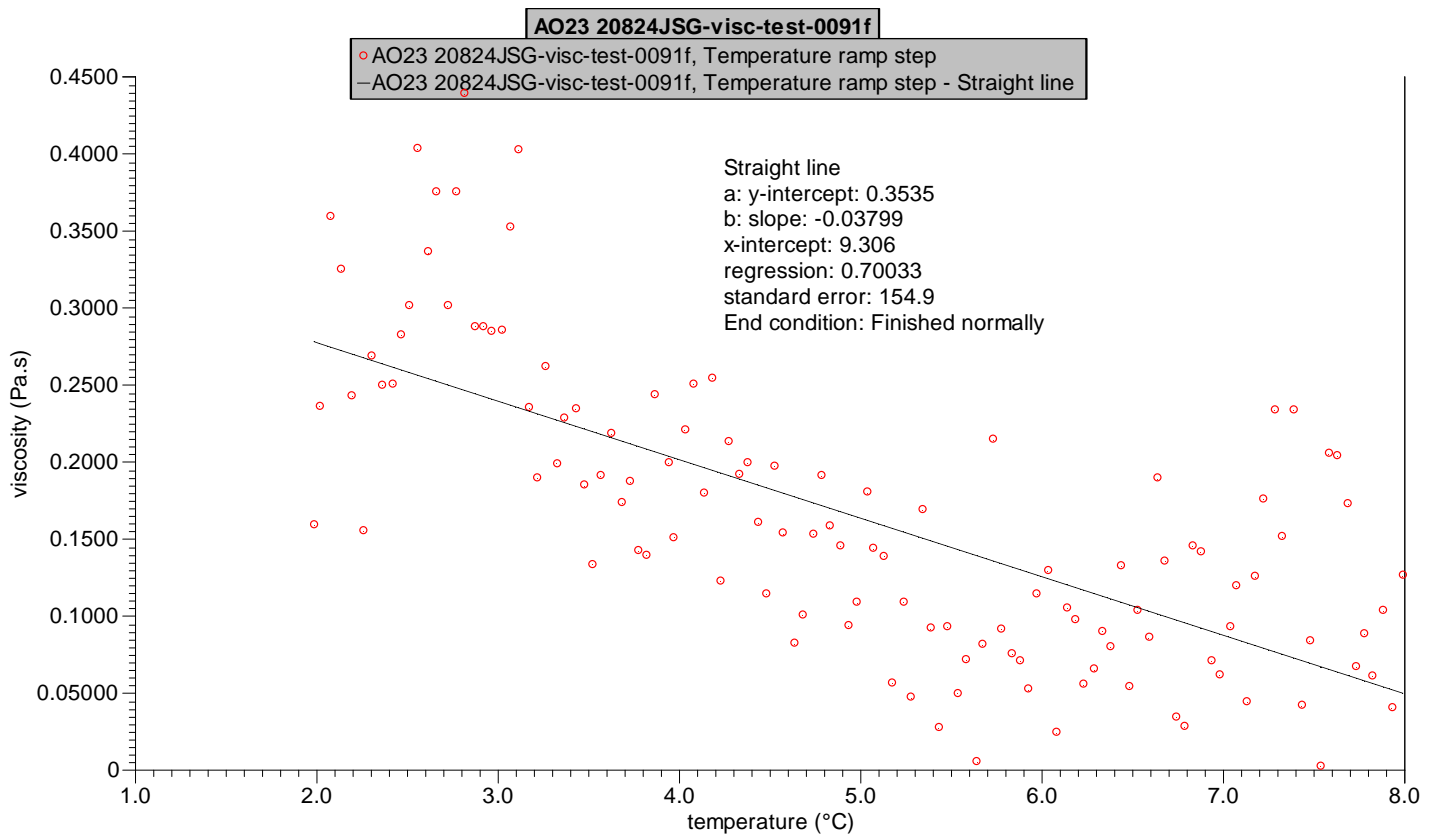
Rheology test

Rheology performed on AR550 (TA instruments) with 60mm 2degree cone on 2% w/v polymer in distilled water. Polymer solution prepared by dissolving solid polymer with water and shaking at 4-10C. Viscosity of solution at 0.1 (sec-1) ramped from 2-8C was measured (10 minute ramp hold 5 second test intervals). This test was repeated at a speed of 0.2 (sec-1) over same ramp.

Results

Rheology Chart

The below chart and table shows AO23 20824JSG Temperature ramp with 0.1 sec-1 spin rate and linear correlation to temperature.



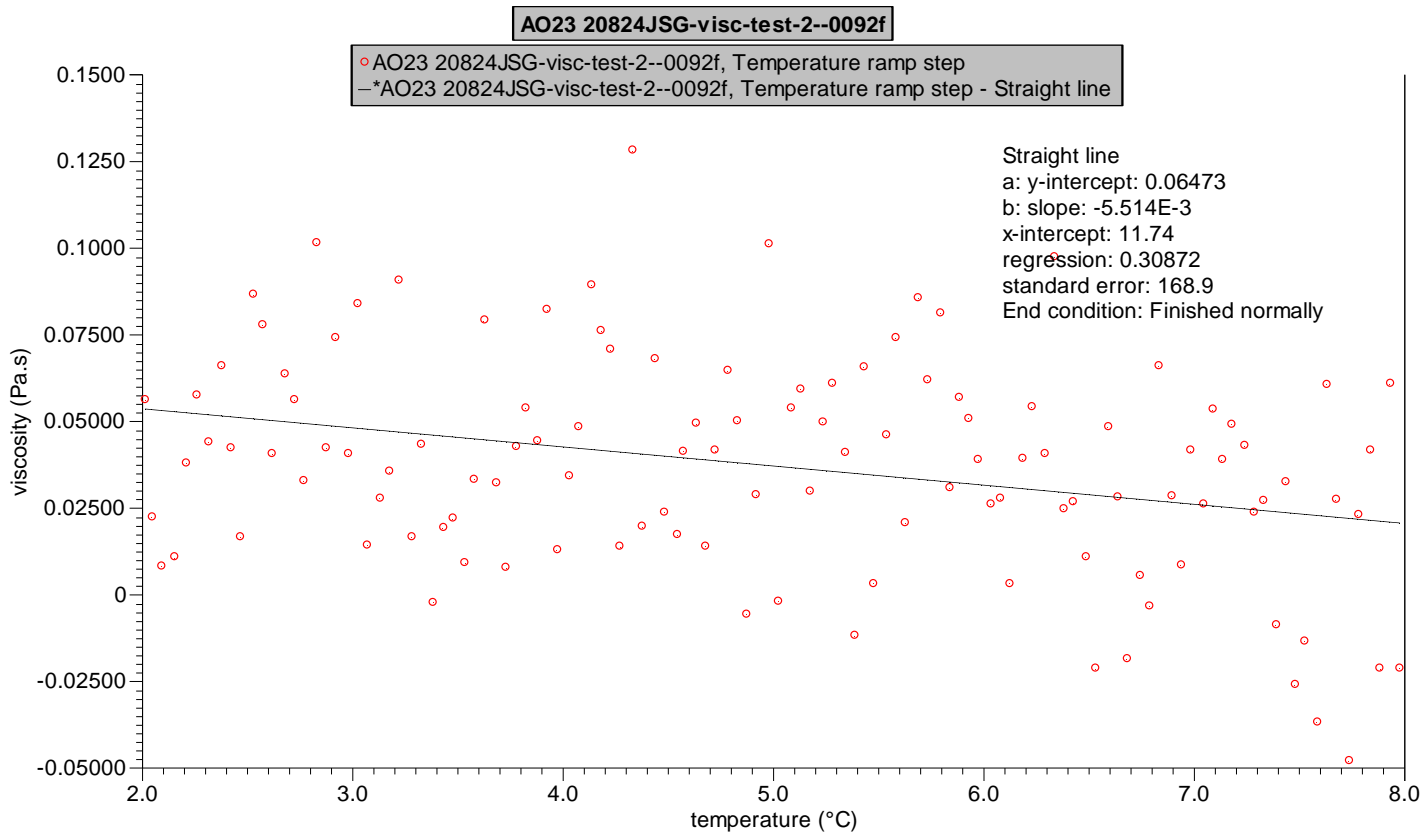
Raw data for AO23 20824JSG Temperature ramp with 0.1 sec-1 spin rate

shear stress Pa	shear rate 1/s	viscosity Pa.s	temperature °C
0.01404	0.08841	0.1588	2
0.02237	0.09479	0.236	2
0.02962	0.08249	0.3591	2.1
0.0314	0.09674	0.3246	2.1
0.02706	0.1114	0.2428	2.2
0.0171	0.1103	0.155	2.3
0.02668	0.09938	0.2685	2.3
0.02473	0.09912	0.2495	2.4
0.02396	0.09568	0.2505	2.4
0.02914	0.1033	0.282	2.5
0.02978	0.09895	0.301	2.5
0.03291	0.08163	0.4032	2.6
0.02732	0.08134	0.3358	2.6
0.03175	0.0846	0.3752	2.7
0.03214	0.1068	0.3011	2.7
0.03792	0.1012	0.3748	2.8
0.03889	0.08863	0.4388	2.8
0.03016	0.1047	0.2879	2.9
0.027	0.09379	0.2878	2.9
0.03094	0.1087	0.2846	3
0.02256	0.0791	0.2852	3
0.03161	0.08973	0.3523	3.1
0.02834	0.07046	0.4022	3.1
0.02589	0.1102	0.2348	3.2
0.02015	0.1063	0.1895	3.2
0.02307	0.0882	0.2615	3.3
0.0222	0.1117	0.1989	3.3
0.02732	0.1199	0.2279	3.4
0.02582	0.1101	0.2344	3.4
0.01681	0.09114	0.1844	3.5
0.01419	0.1064	0.1334	3.5
0.02108	0.1105	0.1908	3.6
0.02324	0.1065	0.2181	3.6
0.01949	0.1123	0.1736	3.7
0.02094	0.1121	0.1868	3.7
0.01403	0.09868	0.1422	3.8
0.01236	0.08878	0.1392	3.8
0.02005	0.08242	0.2433	3.9
0.02088	0.1049	0.199	3.9
0.01484	0.0983	0.1509	4
0.02031	0.09203	0.2206	4
0.02515	0.1005	0.2502	4.1
0.01775	0.09879	0.1797	4.1

0.0226	0.08888	0.2543	4.2
0.01204	0.09834	0.1225	4.2
0.02185	0.1025	0.2131	4.3
0.02271	0.1183	0.1919	4.3
0.0208	0.1043	0.1994	4.4
0.01738	0.1083	0.1605	4.4
9.76E-03	0.08542	0.1143	4.5
0.01535	0.07789	0.1971	4.5
0.01544	0.1006	0.1534	4.6
8.88E-03	0.1086	0.08172	4.6
9.76E-03	0.09704	0.1006	4.7
0.01389	0.09079	0.153	4.7
0.01861	0.09739	0.1911	4.8
0.01435	0.0908	0.158	4.8
0.01511	0.104	0.1453	4.9
7.43E-03	0.0793	0.09374	4.9
0.01163	0.1072	0.1084	5
0.01908	0.106	0.18	5
0.01144	0.07971	0.1436	5.1
0.01101	0.07954	0.1385	5.1
4.40E-03	0.07834	0.05611	5.2
8.03E-03	0.07368	0.109	5.2
4.73E-03	0.101	0.04682	5.3
0.01836	0.1089	0.1686	5.3
9.28E-03	0.1012	0.09171	5.4
2.61E-03	0.0961	0.02714	5.4
9.02E-03	0.09708	0.09289	5.5
4.48E-03	0.09011	0.04973	5.5
6.86E-03	0.09588	0.07151	5.6
5.88E-04	0.1159	5.07E-03	5.6
7.76E-03	0.09545	0.08125	5.7
0.02123	0.09913	0.2141	5.7
0.01015	0.1109	0.09148	5.8
6.50E-03	0.08605	0.0755	5.8
7.04E-03	0.09911	0.07102	5.9
4.81E-03	0.09227	0.05215	5.9
0.01172	0.1027	0.1141	6
0.01005	0.07778	0.1293	6
2.28E-03	0.09457	0.0241	6.1
0.01122	0.1065	0.1053	6.1
0.01084	0.1117	0.09706	6.2
5.68E-03	0.1029	0.05526	6.2
7.82E-03	0.1201	0.06509	6.3
9.33E-03	0.1038	0.08994	6.3
6.90E-03	0.08669	0.07954	6.4
0.0112	0.08468	0.1323	6.4

4.77E-03	0.08896	0.05364	6.5
8.52E-03	0.08265	0.1031	6.5
7.68E-03	0.08974	0.08562	6.6
0.01807	0.09556	0.1891	6.6
0.01126	0.0831	0.1355	6.7
3.33E-03	0.09728	0.03418	6.7
2.94E-03	0.1061	0.02773	6.8
0.01477	0.1018	0.145	6.8
0.01313	0.09299	0.1413	6.9
6.93E-03	0.09796	0.07072	6.9
5.53E-03	0.08956	0.06169	7
9.79E-03	0.1057	0.09264	7
0.01439	0.1204	0.1195	7.1
4.29E-03	0.09797	0.04382	7.1
0.0114	0.09111	0.1251	7.2
0.01994	0.1136	0.1756	7.2
0.02104	0.0901	0.2335	7.3
0.01742	0.1154	0.151	7.3
0.02462	0.1055	0.2334	7.4
4.46E-03	0.1066	0.04183	7.4
8.43E-03	0.1008	0.08362	7.5
2.50E-04	0.1015	2.46E-03	7.5
0.02021	0.09849	0.2052	7.6
0.01993	0.0977	0.204	7.6
0.01492	0.08634	0.1728	7.7
7.71E-03	0.1153	0.06686	7.7
8.48E-03	0.09636	0.08803	7.8
6.11E-03	0.09993	0.06115	7.8
0.01097	0.1061	0.1034	7.9
4.44E-03	0.1103	0.04028	7.9
0.0117	0.09289	0.126	8

The below chart and table shows AO23 20824JSG Temperature ramped with 0.2 sec-1 spin rate



Raw data for AO23 20824JSG Temperature ramp with 0.2 sec-1 spin rate

shear stress	shear rate	viscosity	temperature
Pa	1/s	Pa.s	°C
0.01105	0.1966	0.0562	2
4.78E-03	0.2137	0.02235	2
1.56E-03	0.1907	8.20E-03	2.1
2.16E-03	0.2016	0.01069	2.1
7.92E-03	0.2094	0.03783	2.2
0.01173	0.2036	0.05761	2.3
9.02E-03	0.2055	0.04389	2.3
0.01341	0.2038	0.06583	2.4
8.52E-03	0.2015	0.04227	2.4
3.28E-03	0.197	0.01667	2.5
0.01674	0.1938	0.08639	2.5
0.01602	0.2063	0.07764	2.6
7.82E-03	0.1933	0.04044	2.6
0.01097	0.1727	0.06354	2.7
0.01021	0.1821	0.05605	2.7
6.71E-03	0.2045	0.03282	2.8
0.02001	0.1974	0.1014	2.8
8.89E-03	0.2109	0.04214	2.9

0.01535	0.2071	0.07414	2.9
9.39E-03	0.2314	0.04059	3
0.01452	0.1734	0.08376	3
3.15E-03	0.2208	0.01428	3.1
5.64E-03	0.2021	0.0279	3.1
7.55E-03	0.2132	0.0354	3.2
0.01631	0.1799	0.09069	3.2
3.25E-03	0.1941	0.01675	3.3
8.45E-03	0.1947	0.04337	3.3
-3.10E-04	0.1418	-2.19E-03	3.4
4.18E-03	0.2174	0.01923	3.4
4.42E-03	0.2022	0.02186	3.5
1.81E-03	0.1966	9.21E-03	3.5
5.66E-03	0.1703	0.03327	3.6
0.01413	0.1787	0.07907	3.6
6.91E-03	0.2141	0.03225	3.7
1.61E-03	0.2081	7.72E-03	3.7
9.33E-03	0.2195	0.0425	3.8
0.01019	0.1895	0.05377	3.8
8.54E-03	0.193	0.04426	3.9
0.0131	0.1597	0.08201	3.9
2.75E-03	0.2152	0.01279	4
7.50E-03	0.2201	0.03408	4
0.011	0.2272	0.04839	4.1
0.01612	0.1808	0.08917	4.1
0.01389	0.1826	0.07606	4.2
0.01292	0.1832	0.07052	4.2
3.11E-03	0.2261	0.01374	4.3
0.02228	0.174	0.128	4.3
3.99E-03	0.2046	0.0195	4.4
0.01376	0.2026	0.0679	4.4
4.75E-03	0.1994	0.0238	4.5
3.83E-03	0.2213	0.0173	4.5
8.28E-03	0.2006	0.0413	4.6
0.01027	0.2084	0.04927	4.6
2.94E-03	0.2097	0.01403	4.7
9.35E-03	0.2256	0.04142	4.7
0.01262	0.1958	0.06446	4.8
0.01059	0.2118	0.04999	4.8
-1.16E-03	0.2073	-5.59E-03	4.9
6.08E-03	0.2112	0.0288	4.9
0.0172	0.17	0.1012	5
-4.07E-04	0.2116	-1.92E-	5

		03	
0.01087	0.2022	0.05378	5.1
0.01097	0.1853	0.05922	5.1
6.55E-03	0.2191	0.02991	5.2
9.89E-03	0.1989	0.0497	5.2
0.01296	0.2132	0.0608	5.3
8.35E-03	0.2042	0.04089	5.3
-2.22E-03	0.1867	-	5.4
0.01332	0.2027	0.06573	5.4
5.68E-04	0.1774	3.20E-03	5.5
9.72E-03	0.2113	0.04603	5.5
0.01368	0.1847	0.07407	5.6
4.38E-03	0.2129	0.02056	5.6
0.01662	0.1939	0.0857	5.7
0.01173	0.1898	0.06182	5.7
0.01447	0.1781	0.08126	5.8
6.05E-03	0.1971	0.03072	5.8
0.01159	0.2045	0.05666	5.9
0.01058	0.2082	0.05081	5.9
8.45E-03	0.2179	0.03879	6
4.96E-03	0.1906	0.02599	6
5.73E-03	0.2071	0.02768	6.1
6.48E-04	0.2049	3.16E-03	6.1
7.87E-03	0.2014	0.03908	6.2
0.01128	0.2089	0.054	6.2
8.39E-03	0.207	0.04052	6.3
0.01879	0.1928	0.09743	6.3
3.89E-03	0.158	0.02459	6.4
4.97E-03	0.187	0.02659	6.4
2.20E-03	0.2021	0.01089	6.5
-4.28E-03	0.2004	-	6.5
8.56E-03	0.1768	0.04842	6.6
4.70E-03	0.1677	0.02804	6.6
-3.62E-03	0.1941	-	6.7
1.12E-03	0.2041	5.51E-03	6.7
-5.96E-04	0.1773	-3.36E-03	6.8
0.01231	0.1869	0.06587	6.8
6.18E-03	0.2176	0.02842	6.9
1.79E-03	0.213	8.39E-03	6.9

7.50E-03	0.1809	0.04148	7
5.65E-03	0.2165	0.02609	7
0.01105	0.2069	0.0534	7.1
8.90E-03	0.2287	0.03889	7.1
9.49E-03	0.1933	0.04909	7.2
7.73E-03	0.18	0.04294	7.2
4.82E-03	0.2028	0.02377	7.3
5.73E-03	0.2114	0.02711	7.3
-1.70E-03	0.1957	-8.71E-03	7.4
6.02E-03	0.1852	0.03248	7.4
-5.05E-03	0.1934	-0.0261	7.5
-2.58E-03	0.1923	-	7.5
-8.00E-03	0.217	-	7.6
0.01115	0.1839	0.06063	7.6
5.51E-03	0.2021	0.02725	7.7
-9.45E-03	0.1964	-	7.7
4.49E-03	0.1948	0.02303	7.8
7.22E-03	0.1742	0.04143	7.8
-4.15E-03	0.1932	-	7.9
0.01206	0.1981	0.06086	7.9
-4.41E-03	0.2081	-0.0212	8

Conclusion

For AO23, the variance with viscosity versus temperature at low temperatures (2-8°C) is relatively little and, unlike its behavior at higher temperatures, displays a normal reduction in viscosity with increasing temperature.