

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Sifat-sifat fisikokimia lempung alam dan lempung modifikasi

5.1.1 Jenis dan identitas mineral

Analisis XRD seperti yang tertera di dalam Table 5.1 menunjukkan bahwa lempung mengandung mineral-mineral muscovit, kaolinit dan kuarsa sesuai dengan *d-spacing* yang diberikan. Fakta ini didukung oleh Y.Anbri et al (2008), M.Hajjaji et al (2001), Grim (1968) dan www.mindat.org. Muscovit termasuk grup mineral mica tipe 2:1 yang tidak mengembang (*non swelling*) dan mengandung K^+ sebagai kation penukar dengan formula $KAl_2Si_3AlO_{10}(OH;F)_2$ (J-Q.Jiang, 2002 dan Grim, 1968). Kaolinit merupakan salah satu mineral yang paling dikenal dari grup kaolin tipe 1:1, tidak mengembang (*non swelling*), tidak memiliki kation penukar dan mempunyai formula $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$ (H.H.Murray, 2000, J.C. Miranda-Trevino & Coles, 2003, A. S. Buchanan & Oppenheim, 1968 dan Grim, 1968), sedangkan kuarsa mempunyai formula SiO_2 .

Tabel 5.1 Identitas dan intensitas lempung alam dan lempung modifikasi

Mineral	<i>d-spacing</i> , Å	INC-0	INC-AA	INC-AC	INC-SA
Kaolinit, Intensitas (Cps)	7,18	145	85,3	103	83,1
	4,4**	366	589	717	425
	3,58	84.4	58.1	81,3	60,7
Muscovit, Intensitas (Cps)	3,34*	1744	2562	2442	2106
	2,45*	158	143	185	153
	2,24	92,3	105	96,1	60,7
	1,67	89,6	105	85	76,7
Kuarsa, Intensitas (Cps)	2,28	142	136	181	141
	2,12	132	140	137	121
	1,98	71,2	101	103	118
	1,81	277	306	255	332
	1,54	156	264	185	220

* dan ** : terdapat juga kuarsa (Y.Anbri et al, 2008 dan M.Hajjaji et al, 2001)

Secara umum, langkah pemodifikasian lempung dengan beberapa garam anorganik tidak merubah jenis mineral. Hal ini sesuai dengan sifat-sifat dari pada mineral kaolinit dan

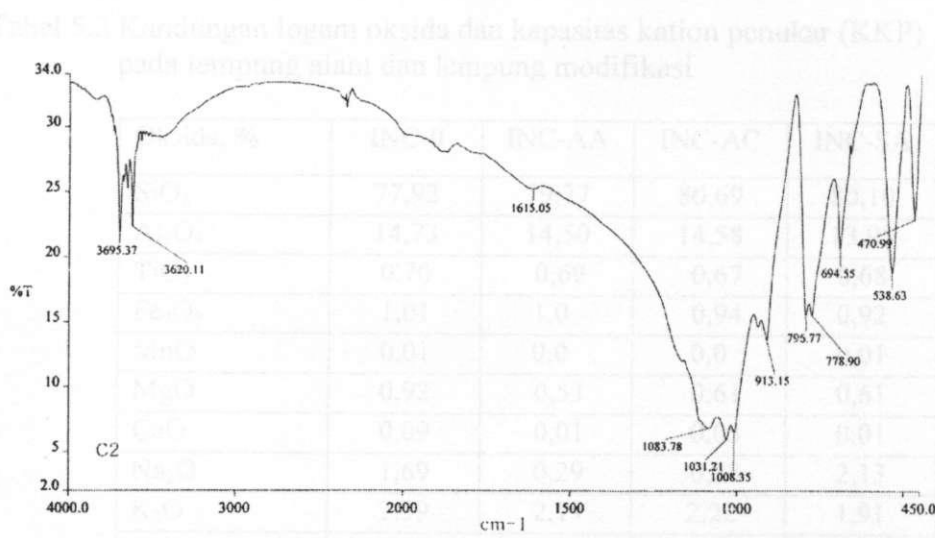
muscovit sebagai penyusunnya, dimana kedua mineral tersebut tergolong mineral yang strukturnya tidak mudah berekspansi atau diganggu oleh lingkungannya. Meskipun demikian, ternyata intensitas dari *d-spacing* kedua mineral ini umumnya berkurang, sedangkan kuarsa meningkat. Peningkatan kuarsa disebabkan karena semua senyawa pemodifikasi tidak cukup kuat untuk melarutkan oksida silika dari rangka utama lempung.

Dalam hal penurunan intensitas kaolinit dan muscovit, pemodifikasi sodium asetat (CH_3COONa) cukup memperlihatkan reaksi yang signifikan, ini disebabkan oleh dealuminasi lempung alam, dan fakta ini juga setara dengan peningkatan pH filtrat padatan lempung alam (dalam air) dari 6.85 menjadi 7.48 setelah dimodifikasi. Disamping itu garam pemodifikasi yang bersifat basa ini juga telah mengalami pertukaran ion antara K^+ dari rangka muscovit dengan Na^+ dari larutan pemodifikasi.

Di pihak lain, pemodifikasi amonium klorida (NH_4Cl) yang sedikit menurunkan intensitas kedua kaolinit dan muscovit, garam asam ini telah menyebabkan dealuminasi sekaligus adsorpsi kation NH_4^+ ke dalam rangka lempung. Asumsi ini didukung oleh penurunan pH dari 6.85 menjadi 6.47. Akan halnya pemodifikasi amonium asetat yang menurunkan intensitas kaolinit tetapi menambah intensitas muscovit, ternyata juga menunjukkan pH relatif tetap (6.8-6.9). Peningkatan intensitas muscovit diperkirakan karena berlaku dekationisasi dari kation-kation di permukaan lempung alam, seperti juga pada dua pemodifikasi yang lainnya.

Data-data XRD di atas diperkuat dengan analisis menggunakan FTIR. Spektra FTIR menunjukkan adanya vibrasi gugus hidroksil O-H pada frekuensi $3750\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$, pita tajam pada 3620 cm^{-1} dan 3695 cm^{-1} selain adanya kumpulan silanol Si-Al-OH yang tidak terganggu (H.Bekkum et al 2001), juga menunjukkan jembatan gusur OH dari situs asam Bronsted Al-OH-Si (Majdana et al, 2003). Daerah ini juga merupakan vibrasi regang Al-Al-OH daripada kaolinit dan muscovit (R.E.Grims, 1968; M.Hajjaji et al, 2001 dan R. H. Worden et al, 2005), sedangkan pita di antara $1900\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$ menggambarkan adanya vibrasi H-O-H di dalam lempung alam. Pita yang melebar dijumpai di daerah 1100 cm^{-1} menunjukkan adanya vibrasi Si(Al)-O dan Si-O(Si) dan pita lemah di daerah 798 cm^{-1} menandakan jembatan Si-O-Si. Menurut M.Hajjaji et al (2001) vibrasi pada

798 dan 778 cm^{-1} mencirikan adanya kuarsa. Pita 695 cm^{-1} yang menyatakan vibrasi cincin 4 atau 6 tetrahedra SiO_4 atau AlO_4 sekaligus menandakan kation non tetrahedra (M.Majdana et al, 2003 & P.Castaldi et al, 2005). Yang berbeda ditemukan setelah modifikasi adalah di daerah 1100 cm^{-1} bukan lagi puncak yang melebar tetapi membentuk puncak-puncak 1083, 1031, 1008 dan 913 cm^{-1} pada INC-AA, INC-AC dan INC-SA. Ini mempertegas adanya vibrasi regang Si(Al)-O dan Si-O(Si). Salah satu spektra FTIR ditunjukkan dalam gambar di bawah ini.



Gambar 5.2 Profil spektra FTIR lempung-modifikasi, INC-AC

5.1.2 Komposisi logam oksida dan jumlah kation yang dipertukarkan

Kadar logam oksida pada lempung alam dan lempung modifikasi tercantum di dalam Tabel 5.2 di bawah ini. Informasi-informasi yang didapat dari tabel tersebut diantaranya terjadi penurunan kadar oksida-oksida dari aluminium, magnesium, kalsium dan potasium, tetapi sebaliknya ada kenaikan oksida-oksida silika dan sodium, sedangkan oksida-oksida yang lain relatif tetap. Dari informasi tersebut ternyata garam sodium asetat yang bersifat basa menyebabkan dealuminasi struktur lempung dengan signifikan (INC-SA > INC-AA > INC-AC).

Pada umumnya logam alkali tanah (magnesium dan kalsium) mengalami dekationisasi setelah modifikasi dengan ketiga jenis pemodifikasi, tetapi logam alkali

memberikan reaksi yang berbeda. Logam sodium cukup banyak terbuang (dekationisasi) oleh pemodifikasi amonium asetat dan amonium klorida, di pihak lain pemodifikasi sodium asetat dapat menambah jumlah sodium di dalam rangkanya. Pengurangan sodium pada dua pemodifikasi amonium terjadi karena pertukaran kation, sedangkan peningkatan sodium pada INC-SA merupakan sumbangan dari pemodifikasinya sendiri. Di pihak logam alkali tanah tadi, diduga telah terjadi pertukaran kation antara NH_4^+ (M.Rozic et al. 2005) dan Na^+ dengan kation Ca^{2+} dan Mg^{2+} pada lempung alam.

Tabel 5.2 Kandungan logam oksida dan kapasitas kation penukar (KKP) pada lempung alam dan lempung modifikasi

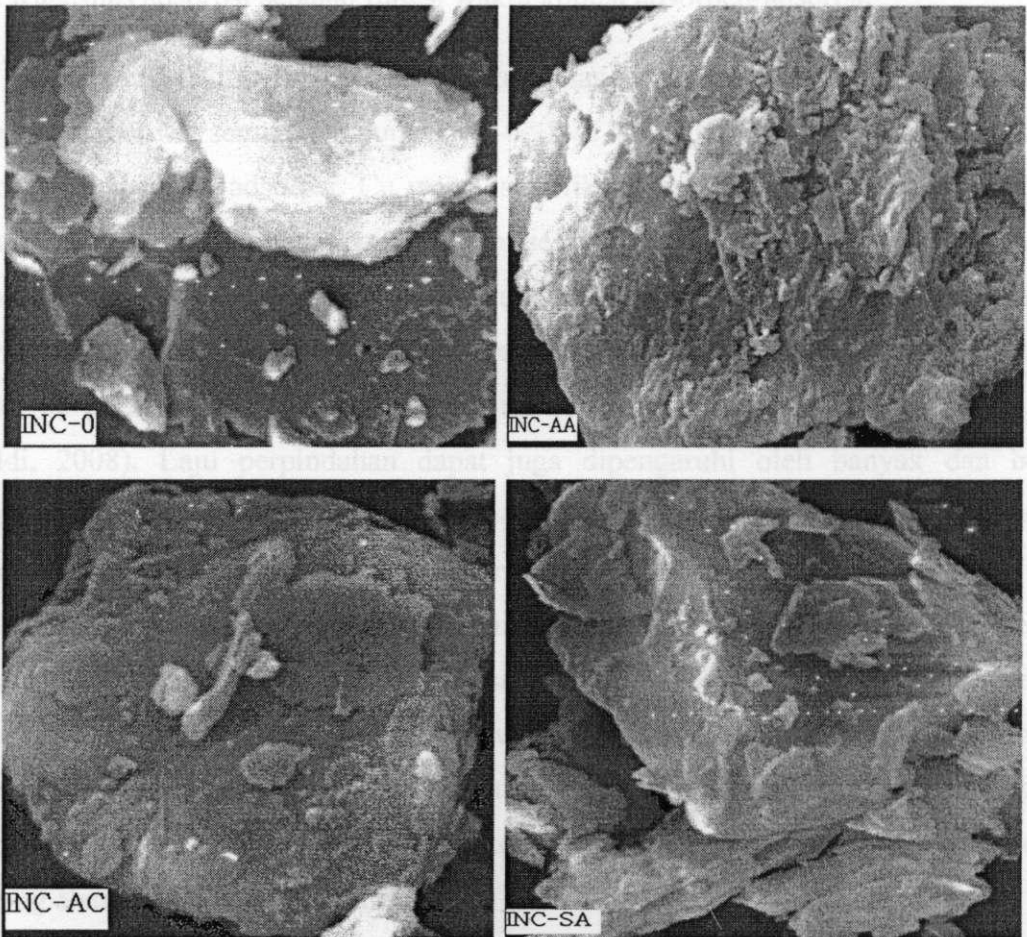
Oksida, %	INC-0	INC-AA	INC-AC	INC-SA
SiO_2	77,92	79,77	80,69	80,10
Al_2O_3	14,73	14,50	14,58	13,93
TiO_2	0,70	0,69	0,67	0,68
Fe_2O_3	1,01	1,0	0,94	0,92
MnO	0,01	0,0	0,0	0,01
MgO	0,92	0,53	0,61	0,61
CaO	0,09	0,01	0,03	0,01
Na_2O	1,69	0,29	0,28	2,13
K_2O	2,39	2,19	2,22	1,91
P_2O_5	0,14	0,12	0,01	0,12
KKP, meq/100 g	45,76	35,52	36,66	32,37

Posisi logam potasium di dalam struktur lempung alam relatif tidak terganggu oleh pemodifikasi kedua garam amonium. Menurut Narkiewicz-Michalek (1992) dalam D.Fischer et al (1998) bahwa permukaan muscovit mempunyai satu muatan per 48 Å, artinya kation K^+ ini terikat jauh pada kisi mineral muscovit sehingga tidak mudah diganggu. M.Rozic et al (2005) juga melaporkan bahwa dekationisasi potassium paling rendah bila menggunakan larutan ammonium sebagai agen modifier. Hal yang menarik bahwa pemodifikasi sodium asetat cukup mengganggu posisi potassium di dalam lempung. Ini disebabkan oleh pertukaran kation antara Na dengan K, dimana pada saat yang sama juga terlihat kenaikan jumlah sodium di dalam lempung modifikasi, seperti yang telah dipaparkan di atas. Fakta-fakta yang ditunjukkan ini ternyata hampir sama dengan analisis XRD.

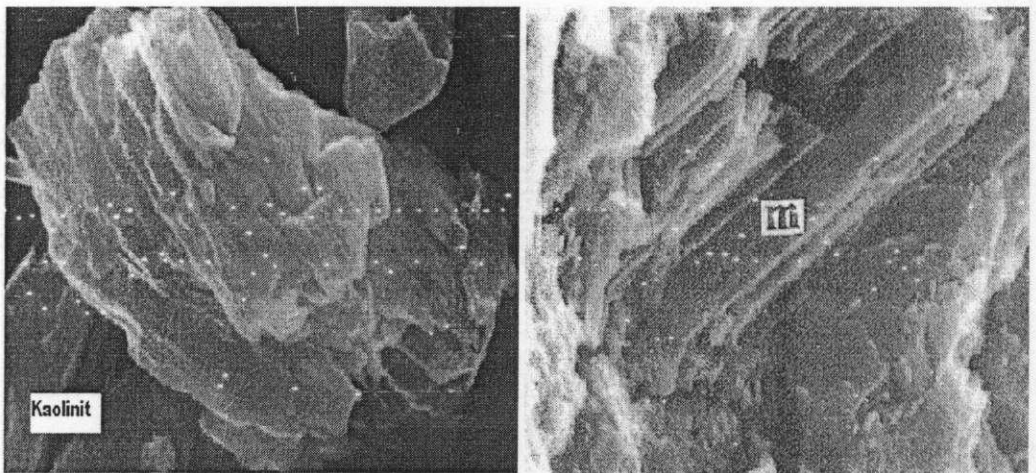
Adapun kapasitas kation penukar (KKP) pada lempung (Tabel 5.2) menunjukkan penurunan untuk semua tindakan modifikasi, ini juga sesuai dengan alasan dekationisasi seperti yang telah dinyatakan sebelumnya.

5.1.3 Morfologi permukaan lempung alam dan lempung modifikasi

Gambaran SEM lempung alam dan lempung modifikasi dari penelitian ini ditampilkan pada Gambar 5.2.a dan pola SEM mineral kaolinit (G.Ekosse, 2001) dan muscovit sebagai pembanding ditunjukkan pada Gambar 5.2.b. Jika membandingkan pola SEM dari sampel dengan pembanding, maka sebagian besar lempung alam dan lempung modifikasi ini sesuai dengan kaolinit (Ekosse.G, 2001), sedangkan muscovit diperkirakan berada pada lapisan yang lebih dalam. Semua lempung ini menampilkan permukaan yang tidak rata atau heterogen. Secara keseluruhan tidak banyak perubahan pola SEM akibat pemodifikasian .



Gambar 5.2 a. Foto SEM dari lempung alam (INC-0) dan lempung modifikasi INC-AA, INC-AC dan INC-SA dengan pembesaran 5000x



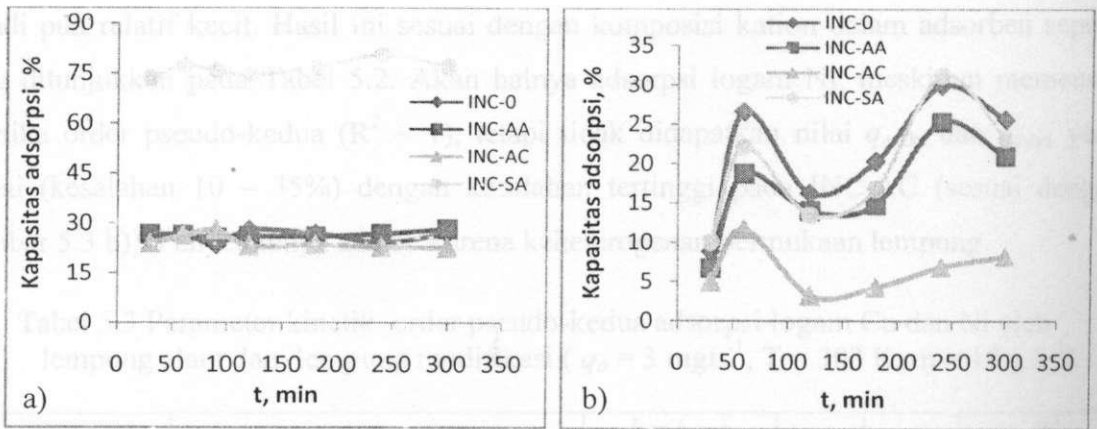
Gambar 5.2.b. SEM kaolinit dari Kgwagkwe -kiri dan muscovit (m) yang terbenam di dalam plate kaolinit - kanan, (G.Ekosse, 2001)

5.2 Studi adsorpsi logam Cu dan Ni oleh lempung alam dan lempung modifikasi.

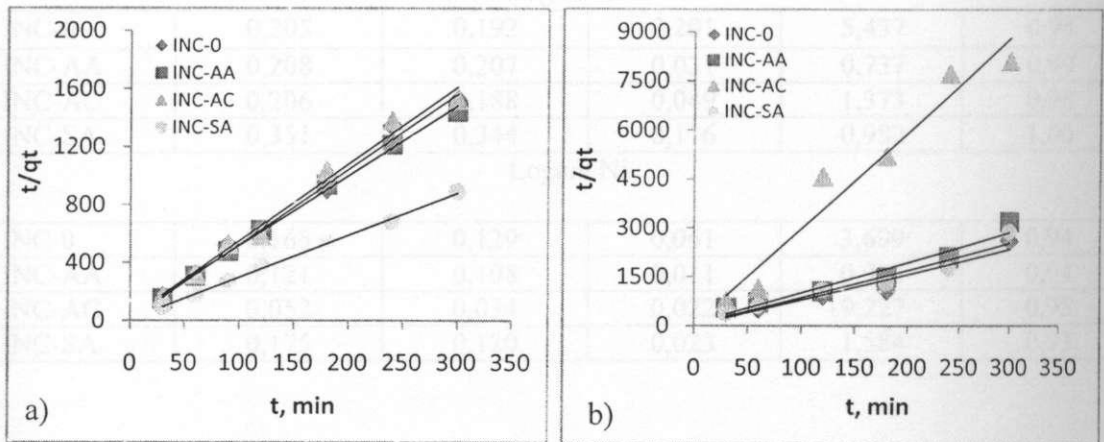
5.2.1 Kapasitas adsorpsi sebagai fungsi waktu kontak adsorben-adsorbat

Pengaruh waktu adsorpsi terhadap kapasitas adsorpsi logam Cu, pada Gambar 5.3 a ditunjukkan bahwa semua lempung INC-0, INC-AA, INC-AC dan INC-SA tidak ada perbedaan kapasitas adsorpsi Cu yang signifikan terhadap waktu, yang berarti laju adsorpsinya berlangsung cepat pada awal proses dan penempelan adsorbat cukup banyak di permukaan adsorben. Selanjutnya pada penambahan waktu, situs adsorpsi yang masih ada diperebutkan oleh Cu sesamanya sehingga memperlambat laju perpindahan Cu dari fase larutan ke permukaan lempung (K.G.Bhattacharyya & Gupta, 2006 dan D.L.Guerra & Airoidi, 2008). Laju perpindahan dapat juga dipengaruhi oleh banyak dan besarnya kompleks terhidrat yang menutupi situs adsorpsi, semakin banyak kompleks yang terbentuk maka semakin sulit dan lambat terjadi adsorpsi.

Namun pada adsorpsi Ni (Gambar 5.3 b), kapasitas adsorpsi cukup bervariasi dengan kenaikan waktu kontak, dimana sampai 60 menit pertama kapasitas meningkat kemudian turun dan naik lagi sampai waktu 240 menit. Pada kasus ini nampaknya heterogenitas permukaan adsorben, seperti ditunjukkan oleh morfologi lempung, lebih berperan dimana distribusi situs adsorpsi tidak merata ke setiap bagian dari pada adsorben lempung alam dan lempung modifikasi.



Gambar 5.3 Kapasitas adsorpsi a) Cu dan b) Ni oleh lempung sebagai fungsi waktu



Gambar 5.4 Grafik order pseudo-kedua adsorpsi a) Cu dan b) Ni oleh lempung

Mekanisme adsorpsi logam Cu dan Ni pada adsorben lempung digambarkan dengan model kinetika order pseudo-kedua dengan memplot t/q_t versus t (Gambar 5.4) sehingga didapat q_e dari nilai slop dan h dari nilai intersep. Melalui Tabel 5.3 didapatkan kesesuaian antara harga $q_{e,eks}$ dan $q_{e,hit}$ untuk adsorpsi Cu oleh lempung (kesalahan 2 – 8%), $R^2 \sim 1$, dan ternyata INC-SA yang mempunyai kesalahan yang paling kecil (2%). Hasil ini sesuai dengan Gambar 5.3 a) di atas. Pemenuhan terhadap model kinetik order pseudo-kedua ini menunjukkan bahwa laju adsorpsi logam Cu pada lempung alam dan lempung modifikasi berjalan secara pertukaran kation yang diikuti dengan pengomplekan karena ada gaya-gaya valensi melalui pertukaran dan penggunaan bersama elektron di antara kation Cu dengan kation-kation penukar di permukaan adsorben (T.S.Anirudhan & Radhakrishnan (2007). Namun begitu, karena laju jerapan awal (h) cukup rendah maka proses adsorpsi kimia yang

terjadi pun relatif kecil. Hasil ini sesuai dengan komposisi kation dalam adsorben seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.2. Akan halnya adsorpsi logam Ni, meskipun memenuhi kinetika order pseudo-kedua ($R^2 \sim 1$), tetapi tidak didapatkan nilai $q_{e,eks}$ dan $q_{e,hit}$ yang sesuai (kesalahan 10 – 35%) dengan kesalahan tertinggi pada INC-AC (sesuai dengan Gambar 5.3 b)). Penyebabnya adalah karena keheterogenan permukaan lempung.

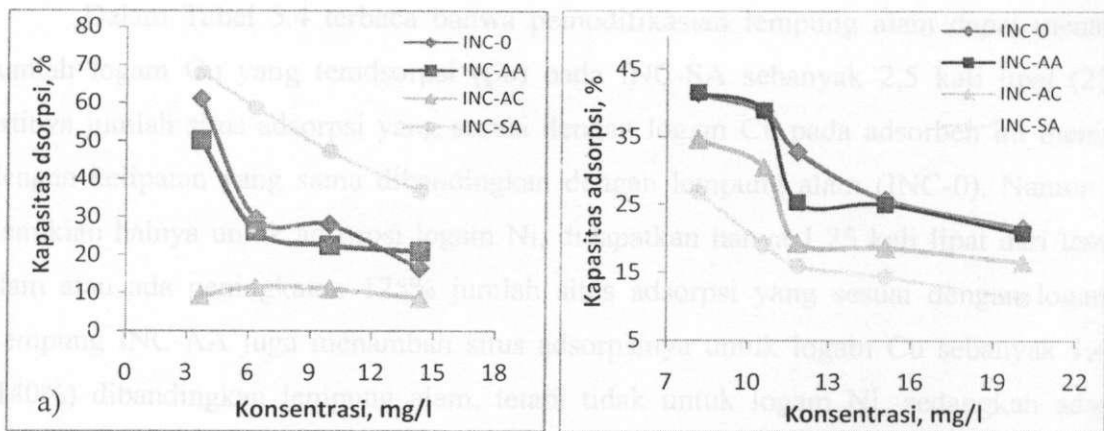
Tabel 5.3 Parameter kinetik order pseudo-kedua adsorpsi logam Cu dan Ni oleh lempung alam dan lempung modifikasi ($q_o = 3 \text{ mgL}^{-1}$, $T = 303 \text{ K}$, $m = 10 \text{ g L}^{-1}$)

Parameter	$q_{e,eks}$ mg g ⁻¹	$q_{e,hit}$ mg g ⁻¹	$h = k_2 q_e^2$ mg g ⁻¹ min ⁻¹	k_2 g mg ⁻¹ min ⁻¹	R^2
Logam Cu					
INC-0	0,205	0,192	0,201	5,437	0,98
INC-AA	0,208	0,207	0,031	0,737	0,99
INC-AC	0,206	0,188	0,049	1,373	0,98
INC-SA	0,351	0,344	0,116	0,982	1,00
Logam Ni					
INC-0	0,165	0,129	0,061	3,699	0,94
INC-AA	0,121	0,108	0,011	0,975	0,94
INC-AC	0,052	0,034	0,022	19,227	0,95
INC-SA	0,175	0,120	0,023	1,584	0,93

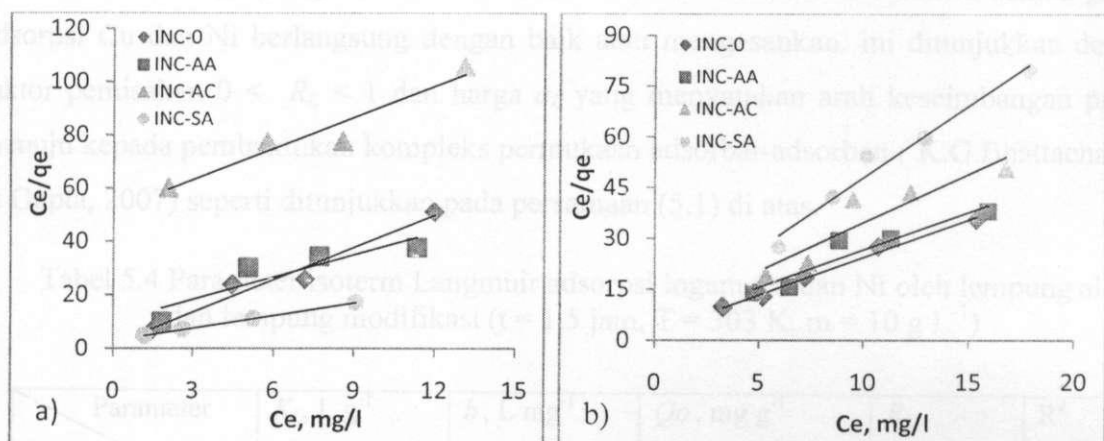
5.2.2 Kapasitas adsorpsi sebagai fungsi konsentrasi adsorbat

Pada Gambar 5.5 terlihat kapasitas adsorpsi (%) logam Cu dan Ni berkurang dengan kenaikan konsentrasi ion-ionnya dalam larutan. Jumlah situs adsorpsi yang tersedia pada adsorben cukup untuk mengadsorpsi sedikit kation adsorbat (konsentrasi rendah), namun jika jumlah adsorbat bertambah dengan jumlah situs adsorpsi yang sama maka akan terjadi persaingan yang ketat sesama kation untuk mendapatkan situs adsorpsi sehingga mengurangi prosentase adsorpsi adsorbat (K.G.Bhattacharyya & Gupta, 2008).

Efek modifikasi terhadap lempung alam memberi kesan yang beragam. Untuk adsorpsi logam Cu, adsorben INC-SA memberikan kapasitas terbesar dan pemodifikasi ammonium (INC-AA dan INC-AC) memberi kesan negatif atau mempunyai kapasitas lebih rendah dari lempung alam. Sedangkan untuk adsorpsi logam Ni, semua perlakuan modifikasi memberikan efek negatif.

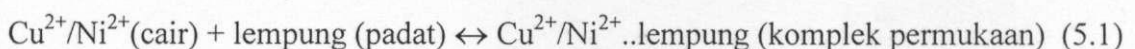


Gambar 5.5 Kapasitas adsorpsi a) Cu dan b) Ni oleh lempung sebagai fungsi konsentrasi



Gambar 5.6 Grafik isoterm Langmuir adsorpsi a) Cu dan b) Ni oleh lempung

Untuk mempelajari interaksi kimia di antara kation Cu^{2+} atau Ni^{2+} dengan adsorben lempung alam dan lempung modifikasi, maka data dianalisis menggunakan isoterm Langmuir (persamaan 2.3). Isoterm Langmuir menggambarkan adanya adsorpsi kimia monolayer yang kuat dan spesifik oleh adsorben (K.G.Bhattacharyya & Gupta, 2007). Dengan memplot C_e versus C_e/q_e (Gambar 5.6), maka diperoleh nilai parameter seperti tertera di dalam Tabel 5.4. Kapasitas monolayer Langmuir Q_0 menyatakan jumlah kation Cu^{2+} atau Ni^{2+} yang menutupi situs adsorpsi per satuan berat lempung alam dan lempung modifikasi dari pada proses adsorpsi:



Dalam Tabel 5.4 terbaca bahwa pemodifikasian lempung alam dapat menambah jumlah logam Cu yang teradsorpsi (Q_0) pada INC-SA sebanyak 2,5 kali lipat (250%), artinya jumlah situs adsorpsi yang sesuai dengan logam Cu pada adsorben ini meningkat dengan kelipatan yang sama dibandingkan dengan lempung alam (INC-0). Namun tidak demikian halnya untuk adsorpsi logam Ni, didapatkan hanya 1,25 kali lipat dari lempung alam atau ada peningkatan 125% jumlah situs adsorpsi yang sesuai dengan logam Ni. Lempung INC-AA juga menambah situs adsorpsinya untuk logam Cu sebanyak 1,4 kali (140%) dibandingkan lempung alam, tetapi tidak untuk logam Ni, sedangkan adsorben INC-AC mengalami pengurangan situs pada kedua adsorbat Cu dan Ni.

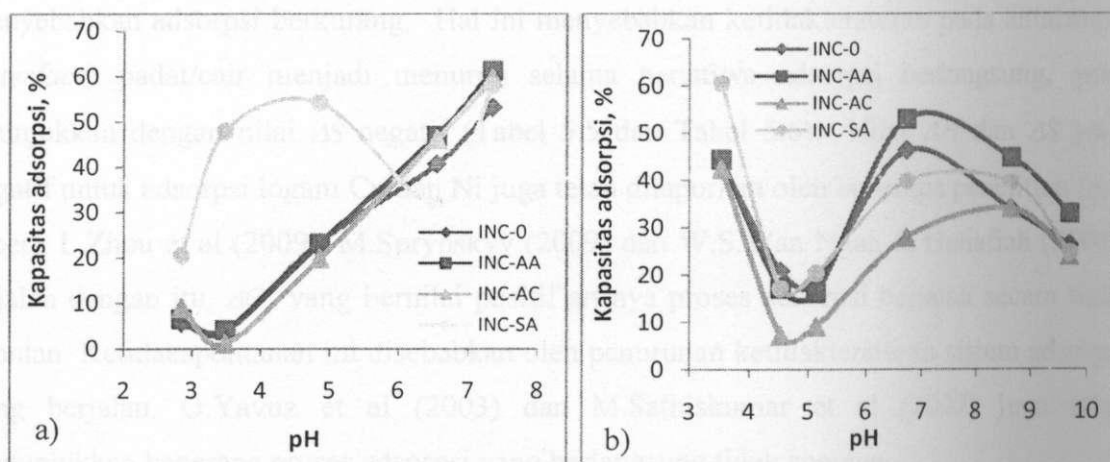
Dari nilai Q_0 yang diberikan di dalam tabel di atas terbukti bahwa semua proses adsorpsi Cu dan Ni berlangsung dengan baik atau mengesankan, ini ditunjukkan dengan faktor pemisahan $0 < R_L < 1$ dan harga a_L yang menyatakan arah keseimbangan proses menuju kepada pembentukan kompleks permukaan adsorbat-adsorben (K.G.Bhattacharyya & Gupta, 2007) seperti ditunjukkan pada persamaan (5.1) di atas.

Tabel 5.4 Parameter isoterm Langmuir adsorpsi logam Cu dan Ni oleh lempung alam dan lempung modifikasi (t = 1.5 jam, T = 303 K, m = 10 g L⁻¹)

Parameter Sampel	$K_L, L\ g^{-1}$	$b, L\ mg^{-1}$	$Q_0, mg\ g^{-1}$	R_L	R^2
Logam Cu					
INC-0	0,639	2,570	0,249	0,054	0,96
INC-AA	0,099	0,277	0,359	0,423	0,81
INC-AC	0,019	0,076	0,256	0,258	0,93
INC-SA	0,345	0,544	0,634	0,207	1
Logam Ni					
INC-0	0,444	0,987	0,450	0,077	0,99
INC-AA	0,226	0,503	0,450	0,141	0,90
INC-AC	0,165	0,474	0,349	0,148	0,86
INC-SA	0,187	0,794	0,558	0,094	0,97

5.2.3 Kapasitas adsorpsi sebagai fungsi pH larutan adsorbat

Kapasitas adsorpsi logam Cu (Gambar 5.7 a)) oleh adsorben lempung INC-0, INC-AA dan INC-AC meningkat dengan kenaikan pH larutan adsorbat dari 3,5 -7,4 (50-60% pada pH 7,4 dengan pH adsorben 6,5-7). Pada adsorbat dengan pH rendah, konsentrasi ion hidrogen di dalam larutan adsorbat cukup tinggi dan bersama-sama dengan kation Cu^{2+} akan bersaing untuk mendapatkan situs adsorpsi di permukaan adsorben, karena itu adsorpsi kation berkurang. Kenaikan pH dapat mengurangi kompetisi sehingga adsorpsi Cu^{2+} meningkat. Untuk lempung INC-SA (pH 7,5), menurut S.M.Dal Bosco et al (2005) situs aktif permukaan menjadi lebih negatif dengan kenaikan pH karena hidroksilasi permukaan, jika berinteraksi dengan adsorbat yang sedikit asam (pH 5) dimana jumlah kation Cu^{2+} relatif lebih banyak dari pada proton, maka adsorpsi Cu^{2+} cukup besar (54%) dan jika berada dalam adsorbat dengan pH 7,4, dimana sudah terbentuk Cu(II) hidroksida (K.G.Bhattacharyya & Gupta , 2006), maka adsorpsi menjadi lebih banyak (58%), karena adsorpsi disumbangkan oleh Cu^{2+} dan Cu(II) hidroksida.



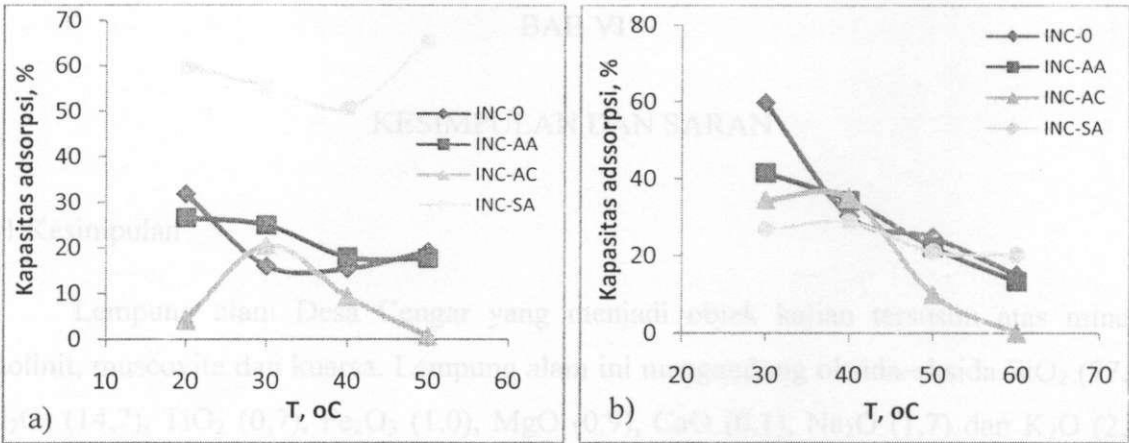
Gambar 5.7 Kapasitas adsorpsi a) Cu dan b) Ni oleh lempung sebagai fungsi pH

Kapasitas adsorpsi (%) logam Ni agak fluktuatif dengan kenaikan pH. Semua adsorben menunjukkan kapasitas adsorpsi 40 - 60% pada pH 3,5 (terbanyak oleh INC-SA) dan 28 - 53 % pada pH 6,7 (terbanyak oleh INC-AA). S.M.Dal Bosco et al (2005) mengamati adsorpsi Ni terbanyak pada pH 5-6 dalam bentuk kation Ni^{2+} .

5.2.4 Kapasitas adsorpsi sebagai fungsi temperatur proses

Idealnya untuk mencapai situs adsorpsi di permukaan adsorben, adsorbat memerlukan sejumlah energi atau panas. kenyataannya kedua adsorbat logam Cu dan Ni pada penelitian ini cukup dengan sedikit energi atau panas yang rendah. Seperti ditunjukkan pada Gambar 5.8, adsorpsi logam Cu dan Ni pada semua lempung berkurang dengan kenaikan suhu proses. Kenyataan dari hasil tersebut dievaluasi dengan menggunakan persamaan (2.8) untuk menentukan jalannya proses adsorpsi. Nilai negatif ΔH (Tabel 5.5 dan 5.6) menyatakan bahwa adsorpsi bersifat eksotermis dan berlangsung secara fisika (fisorpsi). Nilai panas adsorpsi yang rendah ini menunjukkan kedua logam Cu dan Ni menempel ke permukaan adsorben lempung hanya dengan interaksi molekular yang lemah. Meskipun secara kinetika adsorpsi logam-logam ini terjadi secara kimia, namun nilai laju awal adsorpsi (h) nya yang sangat rendah sesuai dengan panas adsorpsi yang diberikan secara termodinamika. Kenaikan temperatur menyebabkan mobilitas ion-ion Cu dan Ni meningkat sehingga keluar dari permukaan padat menuju fasa cair dan menyebabkan adsorpsi berkurang. Hal ini menyebabkan ketidakteraturan pada antarmuka (*interface*) padat/cair menjadi menurun selama peristiwa adsorpsi berlangsung, yang ditunjukkan dengan nilai ΔS negatif (Tabel 5.5 dan Tabel 5.6). Nilai ΔH dan ΔS yang negatif untuk adsorpsi logam Cu dan Ni juga telah dilaporkan oleh beberapa penelitian lain, seperti L.Zhou et al (2009), M.Sprynskyy (2009) dan W.S.Wan Ngah & Hanafiah (2008). Sejalan dengan itu, ΔG yang bernilai positif artinya proses adsorpsi berjalan secara tidak spontan. Ketidaksponatan ini disebabkan oleh penurunan ketidakteraturan sistem adsorpsi yang berjalan. O.Yavuz et al (2003) dan M.Sathiskumar et al (2007) juga telah menunjukkan beberapa proses adsorpsi yang berlangsung tidak spontan.

Mengacu pada besaran termodinamika (Tabel 5.5 dan 5.6), pemodifikasian lempung alam dengan ketiga jenis pemodifikasi memberikan hasil yang bervariasi. Modifikasi dengan amonium klorida memberikan efek negatif, sedangkan amonium asetat dan sodium asetat menunjukkan efek positif, dengan urutan: INC-SA > INC-AA > INC-0 > INC-AC. Adsorben dengan pemodifikasi sodium asetat (INC-SA) memberikan $-\Delta H$, $-\Delta S$ dan ΔG paling rendah, artinya proses adsorpsi menuju kepada pembentukan kompleks adsorben – adsorbat dengan kespontanan yang cukup besar (spontan, $\Delta G = 0$).



Gambar 5.8 Kapasitas adsorpsi a) Cu dan b) Ni oleh lempung sebagai fungsi temperatur

Tabel 5.5 Parameter termodinamika adsorpsi logam Cu oleh lempung
($t = 1.5$ jam, $q_o = 3 \text{ mgL}^{-1}$, $m = 10 \text{ g L}^{-1}$)

Parameter Sampel	$-\Delta H$, kJmol^{-1}	$-\Delta S$, $\text{Jmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	ΔG , kJmol^{-1}				R^2
			293 K	303K	313 K	323 K	
INC-0	24,79	111,14	7,77	8,88	9,99	11,11	0,89
INC-AA	15,77	81,17	8,01	8,82	9,64	10,45	0,88
INC-AC	93,27	346,92	8,38	11,84	15,31	18,78	0,95
INC-SA	9,61	48,39	4,57	5,05	5,53	6,02	0,95

Tabel 5.6 Parameter termodinamika adsorpsi logam Ni oleh lempung
($t = 1.5$ jam, $q_o = 8 \text{ mgL}^{-1}$, $m = 10 \text{ g L}^{-1}$)

Parameter Sampel	$-\Delta H$, kJmol^{-1}	$-\Delta S$, $\text{Jmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	ΔG , kJmol^{-1}				R^2
			303 K	313K	323 K	333 K	
INC-0	55,87	201,88	5,29	7,31	9,33	11,35	0,94
INC-AA	43,23	163,80	6,40	8,04	9,67	11,31	0,97
INC-AC	168,94	577,18	5,94	11,71	17,45	23,26	0,93
INC-SA	10,68	62,84	8,36	8,99	9,62	10,25	0,96