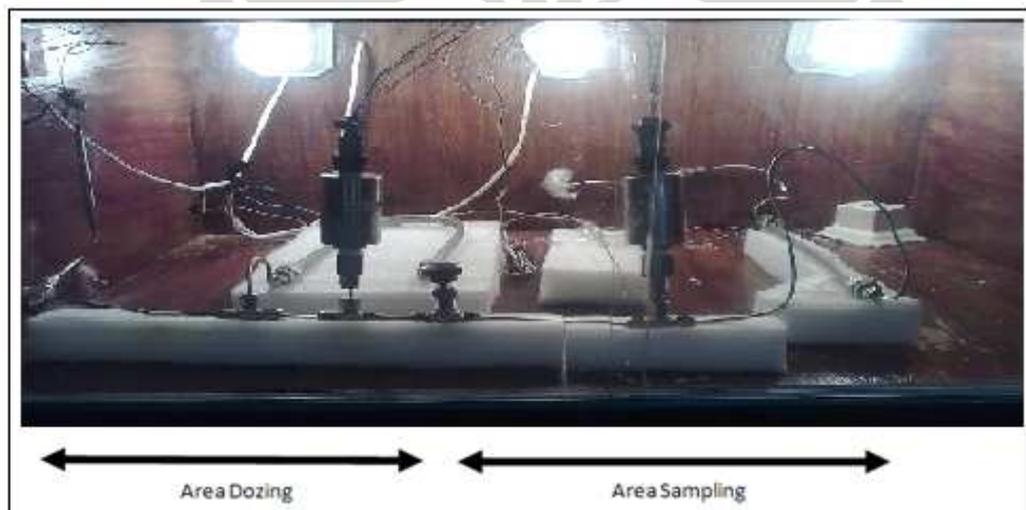


BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Preparasi Peralatan Adsorpsi

Alat uji adsorpsi yang digunakan dalam penelitian ini terangkai seperti Gambar 4.1 di bawah ini. Secara garis besar, alat uji ini terbagi dalam dua area yang terpisah, yaitu area dozing dan area sampling. Kedua area ini sama-sama diletakkan dalam sebuah boks kayu agar temperaturnya dapat dikontrol dengan mudah sehingga kondisi isotermis dapat dicapai. Di antara kedua area ini diletakkan satu buah termokopel untuk membaca temperatur ruang dalam boks yang juga merupakan temperatur adsorpsi dan desorpsi.



Gambar 4.1 Rangkaian Peralatan Uji Adsorpsi

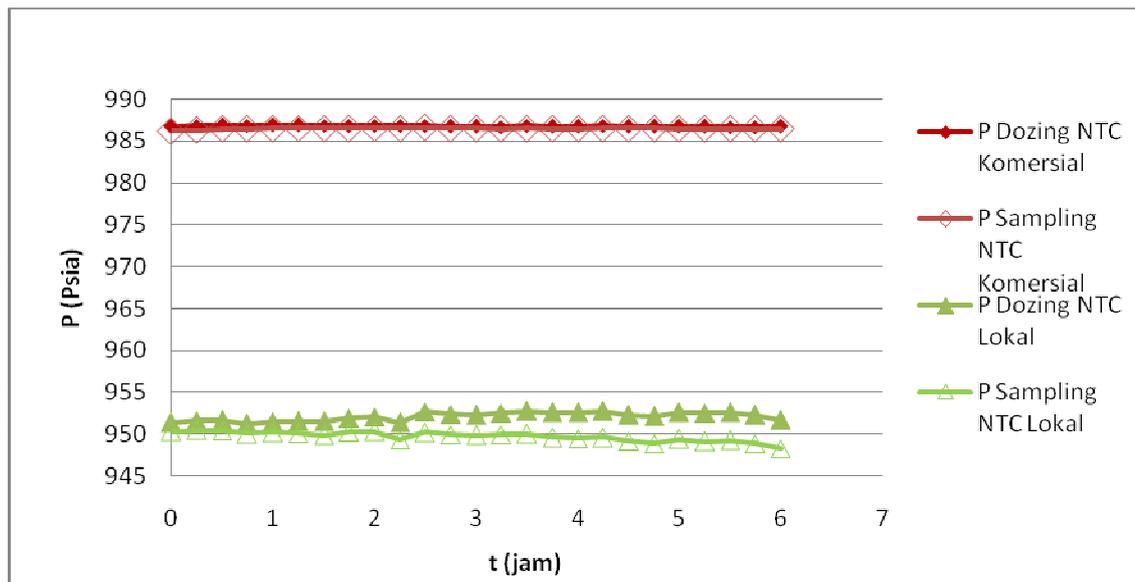
Volume area dozing sangat ditentukan oleh volume *dozing cylinder*. Volume *Dozing cylinder* yang digunakan pada alat uji kira-kira dua kali lebih besar dari volume *sampling cylinder*. Hal ini dimaksudkan agar perubahan tekanan pada area dozing setelah injeksi ke *sampling cylinder* tidak terlalu kecil atau terlalu besar. Bila perubahan terlalu kecil, maka kesalahan pembacaan tekanan yang kecil menghasilkan eror yang besar sehingga akurasi hasil uji rendah. Sedangkan bila terlalu besar, maka dibutuhkan tekanan awal area dozing

yang jauh lebih tinggi untuk injeksi ke *sampling cylinder*. Hasil pengukuran dengan menggunakan air didapat volume area dozing sebesar 23 mL. Volume ini digunakan dalam menentukan jumlah mol gas yang terdapat dalam area dozing.

4.2. Hasil Cek Kebocoran Alat Uji

Cek kebocoran alat uji penting dilakukan untuk melihat kesiapan alat uji yang digunakan. Hal ini disebabkan karena pada uji adsorpsi dilakukan pada tekanan tinggi dan menggunakan gas berbahaya yaitu hidrogen. Cek kebocoran alat dilakukan dengan memonitor tekanan baik pada area dozing maupun sampling selama kurang lebih enam jam pada tekanan tertinggi yang digunakan untuk uji adsorpsi yaitu sekitar 950 psia. Gas yang digunakan untuk cek ini adalah gas helium yang diketahui merupakan gas inert yang tidak berbahaya. Cek kebocoran juga dilakukan dengan menggunakan busa sabun untuk mengidentifikasi langsung letak kebocoran sehingga kebocoran dapat segera diatasi.

Cek kebocoran dilakukan setiap akan melakukan uji adsorpsi baik pada nanotube karbon (NTC) lokal maupun NTC komersial. Dari Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa tekanan baik di area dozing maupun sampling pada cek kebocoran untuk adsorben NTC komersial tetap stabil di angka 986 psia selama 6 jam. Hal ini berarti bahwa tidak terjadi kebocoran pada kedua area ini dan alat uji siap untuk digunakan. Pada cek kebocoran untuk adsorben NTC lokal, terjadi penurunan sekitar 1 psia pada area sampling selama 6 jam yaitu dari 950 ke 949 psia. Sedangkan pada area dozing tidak terjadi penurunan yaitu tetap pada tekanan 951 psia. Walaupun begitu, alat uji ini masih dapat digunakan untuk pengujian adsorpsi hidrogen dari NTC lokal karena uji dimulai dari tekanan rendah ke tekanan tinggi dan waktu adsorpsi yang dibutuhkan pada masing-masing tekanan kurang dari enam jam sehingga kebocoran ini tidak terlalu berpengaruh pada hasil uji.



Gambar 4.2 Kurva Cek Kebocoran Alat Uji Adsorpsi pada Tekanan Tinggi

4.3. Hasil Preparasi Adsorben

Berat NTC yang digunakan untuk pengujian adsorpsi dan desorpsi hidrogen berkisar antara 1,5 sampai 2 gram dimana sesuai dengan kapasitas *sampling cylinder* mini yang dipakai pada penelitian ini. Adapun hasil perhitungan berat NTC yang digunakan secara detail dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.1 Hasil Perhitungan Berat Adsorben

Menghitung Berat Adsorben (nanotube karbon)	
Nanotube karbon komersial	
Berat sampling storage + Nanotube Carbon (NTC) + Glasswoll	105, 50 g
Berat sampling storage + Glasswoll	103,60 g
Berat bersih Nanotube karbon	1,90 g
Nanotube karbon lokal	
Berat sampling storage + Nanotube Carbon (NTC) + Glasswoll	105, 30 g
Berat sampling storage + Glasswoll	103,64 g
Berat bersih Nanotube karbon	1,66 g

Data berat NTC ini dipakai dalam menghitung banyaknya gas hidrogen yang teradsorpsi per gram adsorben sehingga kapasitas adsorpsi antara kedua NTC yang digunakan dapat dibandingkan dengan baik.

Universitas Indonesia

4.4. Hasil Kalibrasi Void Volume Area Sampling

Void volume area *sampling* merupakan volume ruang yang ditempati gas di dalam area sampling dimana di dalamnya termasuk volume kosong dari pori NTC. Void volume ini ditentukan dengan menggunakan gas helium. Selain bersifat inert sehingga tidak berinteraksi dengan atom karbon dari NTC, gas ini juga memiliki diameter molekul yang kecil sehingga dapat mengisi ruang kosong dari pori-pori NTC yang rata-rata berukuran mikropori. Banyaknya adsorben yang digunakan dapat mempengaruhi besarnya void volume, semakin besar jumlah adsorben dalam sampling storage menyebabkan void volume yang didapat semakin kecil.

Pengukuran helium void volume dilakukan pada range tekanan dari uji adsorpsi, yaitu 0-1000 psia. Dari hasil pengukuran pada beberapa tekanan ini, didapat rata-rata helium void volume yang mewakili untuk digunakan pada perhitungan banyaknya gas yang tidak teradsorpsi baik pada tekanan rendah maupun pada tekanan tinggi. **Tabel 4.2 dan 4.3** di bawah ini menunjukkan hasil perhitungan helium void volume untuk setiap adsorben.

Tabel 4.2 Void Volume Nanotube Karbon Komersial

Helium void volume nanotube karbon komersial							
Tekanan sampling (psia)	99,46	201,61	335,25	465,32	601,06	751,76	908,09
He void volume (ml)	13,98	14,02	14,06	14,10	14,12	14,13	14,15
He void volume rata-rata	14,05						
Standar Deviasi	0,056						

Tabel 4.3 Void Volume Nanotube Karbon Lokal

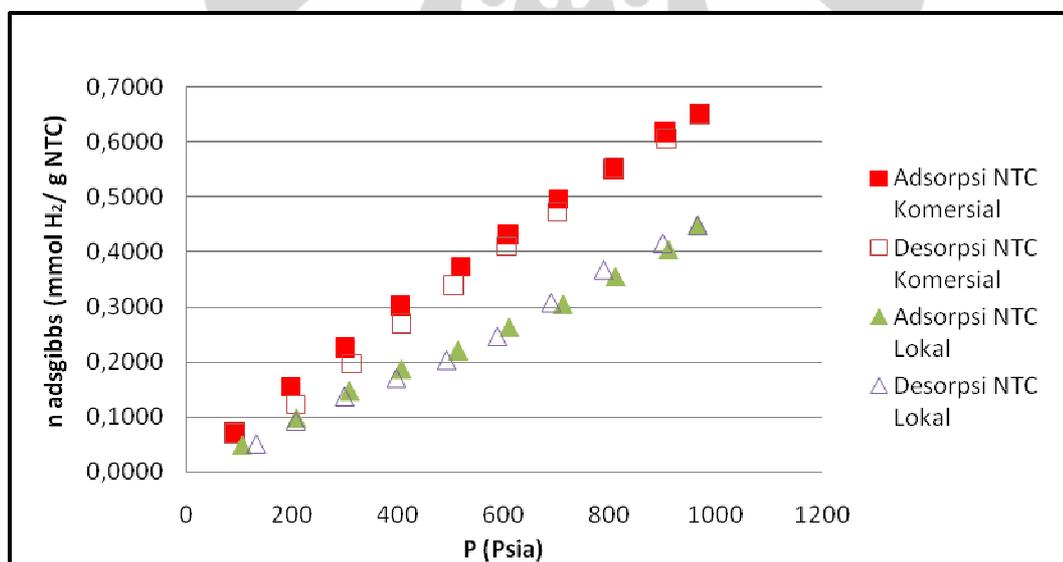
Helium void volume nanotube karbon lokal						
Tekanan sampling (psia)	218,36	352,32	575,11	700,44	810,36	901,36
He void volume (ml)	14,21	14,32	14,42	14,43	14,45	14,46
He void volume rata-rata	14,38					
Standar Deviasi	0,098					

Sebagaimana terlihat dari data yang ditampilkan pada tabel di atas, perbedaan besar nilai void volume pada beberapa tekanan sampling baik pada

NTC komersial maupun lokal relatif kecil. Hal ini dapat dilihat dari nilai standar deviasi yang diperoleh pada kedua NTC yang cukup kecil, yaitu kurang dari 0,1 sehingga void volume rata-rata yang diperoleh cukup mewakili untuk dipakai dalam perhitungan banyaknya gas yang tidak teradsorpsi pada interval tekanan uji adsorpsi.

4.5. Hasil Uji Adsorpsi dan Desorpsi Gas Hidrogen pada Nanotube Karbon

Banyaknya gas hidrogen baik yang diadsorpsi maupun yang didesorpsi pada NTC lokal dan komersial dari hasil uji ini direpresentasikan dalam bentuk mol adsorpsi gibbs. Proses pengambilan data pada setiap kenaikan tekanan adsorpsi atau penurunan tekanan desorpsi dilakukan setelah 1/2 jam dimana tekanan tidak berubah secara signifikan yang menandakan kesetimbangan adsorpsi telah tercapai. Hasil pengujian adsorpsi dan desorpsi gas hidrogen pada kedua sampel NTC ini dapat dilihat pada Gambar 4.3 di bawah ini. Data perhitungan pengujian adsorpsi dan desorpsi pada kedua NTC secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran 2 dan 3.



Gambar 4.3 Kurva Adsorpsi dan Desorpsi Gas Hidrogen

Pada gambar di atas dapat dilihat bahwa kemampuan adsorpsi gas hidrogen yang paling tinggi diperoleh dengan menggunakan NTC komersial. Pada tekanan tertinggi adsorpsi yaitu sekitar 960 psia, NTC komersial mampu

mengadsorpsi gas hidrogen sebesar 0,65 mmol/g NTC atau 0,13 % berat (dalam % excess adsorpsi) sedangkan NTC lokal hanya sebesar 0,44 mmol/g NTC atau 0,09 % berat. Lebih rendahnya kemampuan dari NTC lokal dapat disebabkan karena NTC ini belum murni, masih terdapat zat pengotor seperti logam katalis Ni dan Al yang dapat menutupi permukaan atau pori dari NTC sehingga menghalangi adsorpsi dari molekul hidrogen. Selain itu, diameter dinding NTC lokal yang masih cukup besar, yaitu berkisar antara 50-100 nm dimana tersusun atas banyak lapisan, tidak memberikan ruang pori yang banyak bagi molekul hidrogen untuk terperangkap dan berinteraksi dengan atom karbon dari NTC sehingga kemampuan adsorpsinya menjadi kecil.

Pada gambar di atas juga dapat dilihat bahwa jumlah mol hidrogen yang teradsorpsi terus bertambah dengan kenaikan tekanan adsorpsi. Semakin tinggi tekanan di fasa ruah gas maka semakin banyak pula molekul hidrogen berdifusi mendekati ke permukaan dan masuk ke pori NTC untuk berinteraksi dengan atom karbon sehingga jumlah mol hidrogen yang teradsorpsi semakin besar. Kurva adsorpsi isothermal kedua NTC memiliki kecenderungan untuk masih terus naik dengan menaikkan tekanan di atas 960 psia.

Kurva adsorpsi isothermal yang terbentuk dari adsorpsi hidrogen pada NTC lokal memiliki bentuk yang sama dengan yang dimiliki oleh NTC komersial. Bentuk kurva ini juga sama dengan bentuk kurva adsorpsi isothermal dari NTC yang dilaporkan oleh Li Zhou dan kawan-kawan pada tahun 2004 dimana memiliki tipe yang sama dengan NTC lokal dan NTC komersial, yaitu *multiwalled carbon nanotube* (MWNT) [37]. Adsorpsi isothermal NTC lokal dan NTC komersial mengikuti kurva adsorpsi isothermal tipe I berdasarkan klasifikasi Brunauer. Tipe ini disebut juga isothermal Langmuir dimana menggambarkan adsorpsi satu lapis dan biasanya diperoleh untuk adsorben berpori kecil atau mikropori. Tipe adsorpsi ini juga menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi antara molekul adsorbat dengan adsorben mengikuti interaksi secara fisik.

Tabel 4.4 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Hidrogen dari Adsorben Karbon pada Tekanan 960 Psia dan Temperatur 25°C

Adsorben	Kapasitas Adsorpsi (%berat)	Luas Permukaan (m ² /gram)	Sumber
NTC Komersial (Setelah dimurnikan)	0,13	500	Penelitian saat ini
NTC Lokal (belum dimurnikan)	0,09	126	Penelitian saat ini
MWNT (setelah dimurnikan)	0,14	137	Li Zhou, dkk [37]
MWNT (setelah dimurnikan)	0,19	260	Zubizarreta, dkk [26]
SWNT (setelah dimurnikan)	0,35	720	Yoshitsugu K dkk [38]
Karbon Aktif	0,4	1501	Zubizarreta, dkk [26]

Pada Tabel 4.4 di atas dapat lebih jelas terlihat bahwa NTC komersial memiliki kapasitas adsorpsi hidrogen yang lebih besar daripada NTC lokal disebabkan karena luas permukaan spesifik yang dimiliki NTC komersial lebih besar daripada NTC lokal. Bila dibandingkan dengan hasil penelitian lain, NTC komersial memiliki kapasitas adsorpsi yang hampir sama dengan MWNT yang dilaporkan oleh Li Zhou dan lebih kecil daripada MWNT yang dilaporkan oleh Zubizarreta pada tekanan adsorpsi 960 psia dan temperatur isothermal 25 °C. Walaupun begitu, luas permukaan baik MWNT yang digunakan oleh Li Zhou dan Zubizarreta lebih kecil daripada NTC komersial. Hal ini dapat disebabkan karena MWNT yang digunakan Li Zhou dan Zubizarreta mempunyai distribusi ukuran mikropori yang lebih sempit daripada NTC komersial. Dari hasil percobaan yang dilakukan Zubizarreta, diketahui bahwa distribusi ukuran mikropori yang terdapat pada material karbon juga sangat mempengaruhi kemampuannya dalam mengadsorpsi hidrogen selain parameter luas permukaan. Dapat dilihat juga bahwa kapasitas adsorpsi hidrogen dari NTC komersial juga jauh lebih kecil daripada yang dimiliki karbon aktif. Hal ini disebabkan karena luas permukaan spesifik dari karbon aktif yang jauh lebih besar daripada NTC komersial. Bila dibandingkan dengan SWNT, baik NTC lokal maupun NTC komersial memiliki

kapasitas adsorpsi yang lebih rendah daripada SWNT. Begitu pula dengan tipe MWNT yang dilaporkan oleh Li Zhou dan Zubizrrreta juga lebih kecil daripada SWNT. Selain luas permukaan spesifiknya lebih besar, secara umum SWNT mempunyai kemampuan adsorpsi hidrogen yang lebih besar daripada MWNT. Hal ini disebabkan karena SWNT memiliki sifat elektrik yang lebih baik dan jumlah total mikropori yang lebih besar daripada MWNT. Sifat elektrik mempengaruhi afinitas dari molekul hidrogen terhadap karbon pada NTC. Jumlah total mikropori mempengaruhi banyaknya pori dari NTC yang cocok untuk ditempati oleh molekul hidrogen yang diketahui mempunyai ukuran diameter yang kecil ($2,89 \text{ \AA}$)

Ditinjau dari harga kapasitas penyimpanan hidrogen, baik NTC lokal maupun NTC komersial memiliki kapasitas yang masih di bawah dari target DOE USA, yaitu 6,5 % untuk kapasitas penyimpanan bahan bakar pada kendaraan yang diperbolehkan, dimana nilainya berturut-turut, yaitu 4,5 % dan 3,9 % berat. Bila dibandingkan dengan metode penyimpanan gas bertekanan, penggunaan kedua NTC ini sebagai penyimpan hidrogen juga masih kurang baik, karena besar kapasitas penyimpanannya tidak jauh berbeda dengan penggunaan penyimpanan gas bertekanan biasa. Penggunaan NTC sebagai penyimpan hidrogen baru dapat dikatakan cukup baik jika kapasitas adsorpsi NTC tersebut di atas 1,3 mmol/gram atau 0,26 % berat, dimana pada kapasitas adsorpsi tersebut dapat mereduksi volume gas bertekanan biasa sebesar 0,8 %. Hasil perbandingan kapasitas penyimpanan dengan dan tanpa adsorben dapat dilihat pada Lampiran 4.

Pada Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa kurva adsorpsi isotermis pada kedua NTC sama dengan kurva desorpsi isotermisnya. Hal ini menyatakan bahwa adsorpsi gas hidrogen pada permukaan dari kedua NTC terjadi secara fisik. Beberapa percobaan terdahulu juga mendapatkan hasil yang sama mengenai mekanisme yang terjadi pada adsorpsi hidrogen dari NTC. Tetapi beberapa peneliti lain seperti yang dilakukan oleh Ionnatos dan kawan-kawan (2010) melaporkan proses adsorpsi pada NTC tidak terjadi melalui mekanisme fisik secara keseluruhan melainkan sedikit terjadi secara kimia[28]. Pada proses adsorpsi secara fisik, molekul hidrogen berinteraksi lemah (gaya van der Waals) dengan atom karbon pada NTC sehingga molekul hidrogen mudah dilepaskan

Universitas Indonesia

kembali. Proses adsorpsi secara fisik ini sangat menguntungkan dalam aplikasi NTC sebagai penyimpan gas terutama sebagai bahan bakar pada kendaraan.

4.6. Representasi Data Adsorpsi Dengan Model Langmuir

Sebagaimana telah dijelaskan di atas, adsorpsi isothermal hidrogen baik pada NTC lokal maupun komersial mengikuti kurva adsorpsi isothermal tipe I atau dikenal juga dengan adsorpsi isothermal Langmuir. Persamaan model adsorpsi isothermal Langmuir dapat dilihat pada persamaan di bawah ini.

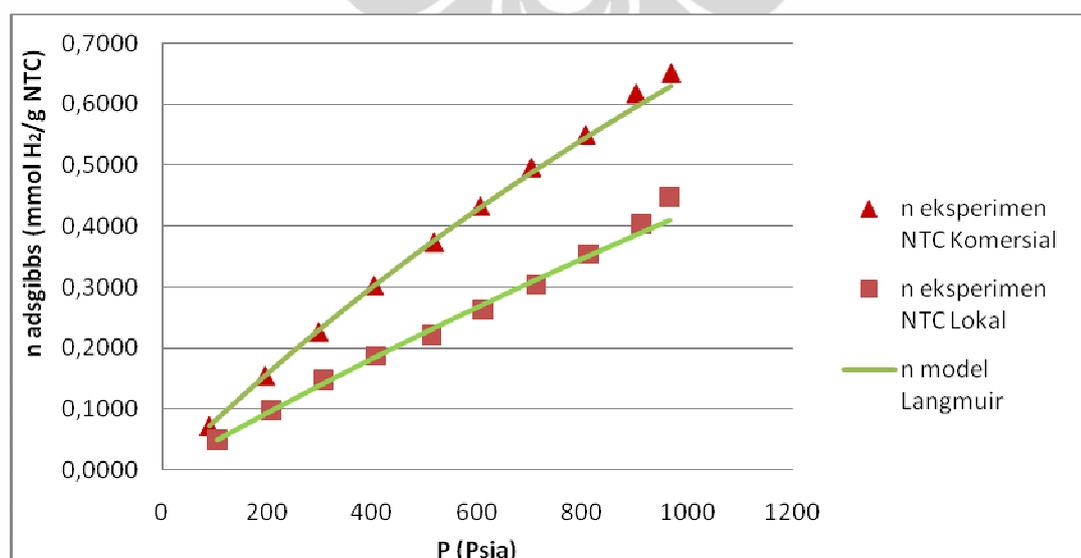
$$n_{\text{gibbs}} = n_{\text{maks}} \frac{bP}{1 + bP} \quad (2.2)$$

dengan

$$b = \left(\frac{\alpha}{k_d V_{\text{maks}}} \right) \exp \left(\frac{Q}{RT} \right) \quad (2.4)$$

Persamaan model di atas menghubungkan jumlah mol gibbs zat yang teradsorpsi terhadap tekanan dan temperatur percobaan. Konstanta n_{maks} menunjukkan kapasitas adsorpsi maksimum dari adsorben yang sebanding dengan banyaknya permukaan aktif yang dimiliki oleh adsorben. Sedangkan b adalah konstanta Langmuir yang merupakan fungsi dari temperatur dan menggambarkan besarnya interaksi yang terjadi antara adsorbat dan permukaan aktif dari adsorben.

Hasil perbandingan antara data adsorpsi hidrogen hasil penelitian terhadap permodelan Langmuir dapat dilihat pada Gambar 4.4 di bawah ini.



Universitas Indonesia

Gambar 4.4 Perbandingan Adsorpsi Hidrogen dengan Permodelan Langmuir

Sedangkan data parameter model Langmuir yang dihasilkan dari kedua NTC dapat dilihat pada Tabel 4.5 di bawah ini.

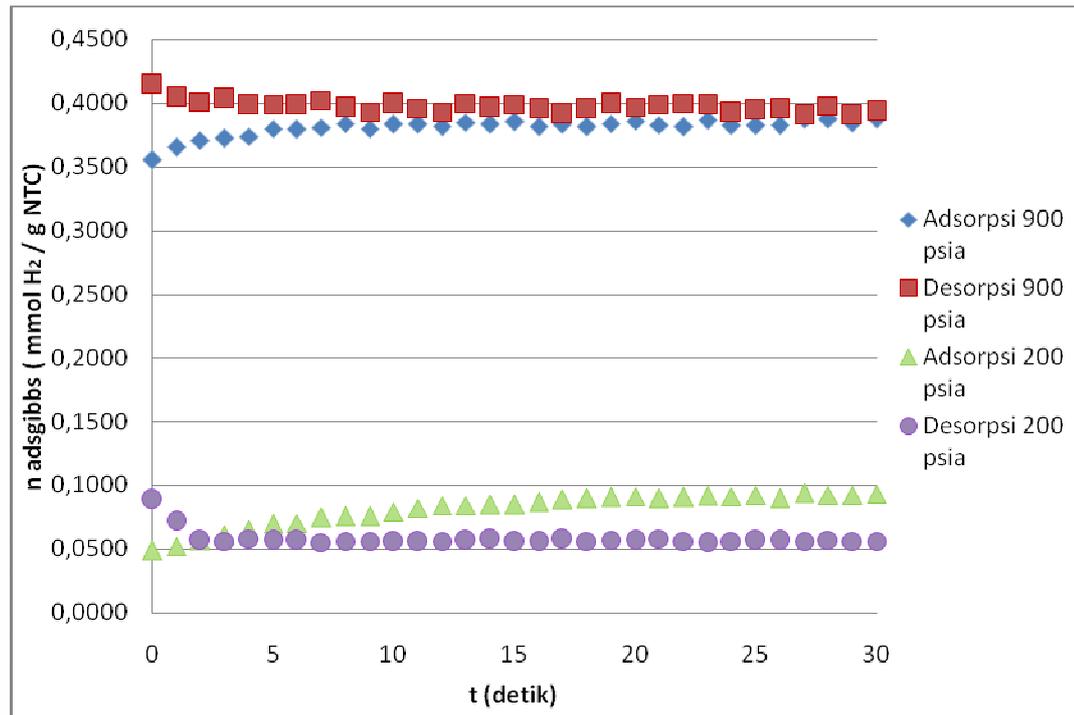
Tabel 4.5 Parameter Model Isotermal Langmuir

NTC	n_{maks}	b	% AAD
Lokal	3,255	0,0001	3,00
Komersial	2,704	0,0003	1,68

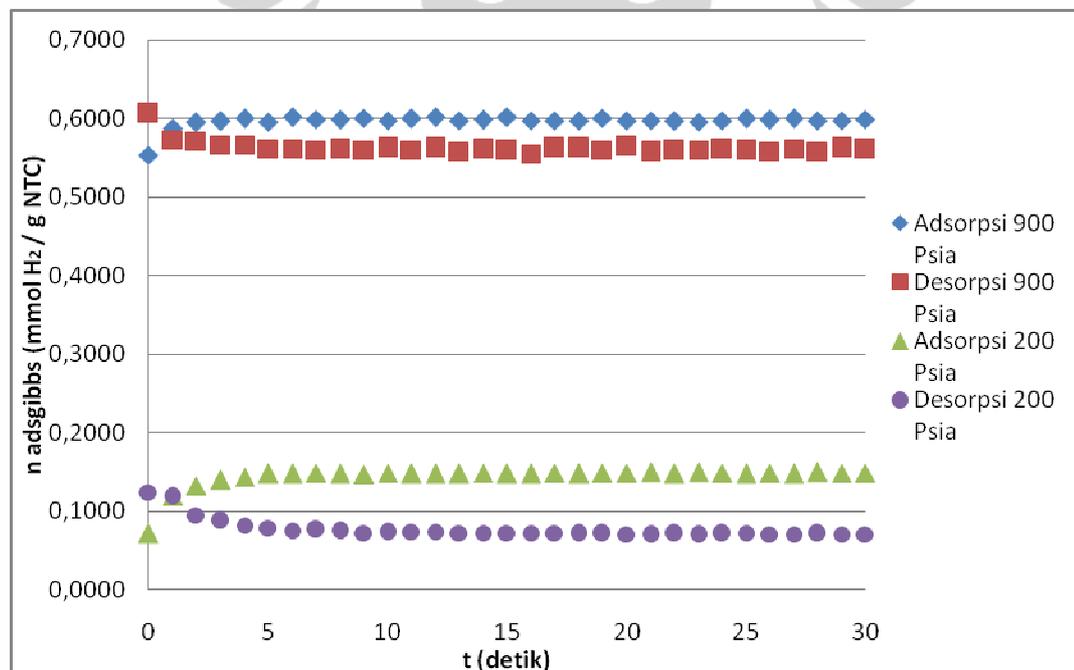
Pada Gambar 4.4 di atas secara umum data adsorpsi baik pada NTC lokal dan NTC komersial dapat direpresentasikan dengan baik oleh permodelan Langmuir. Hal ini didukung oleh nilai % AAD yang didapat untuk kedua NTC berada di bawah 5. Dari konstanta n_{maks} yang dihasilkan dapat diketahui bahwa jumlah maksimum mmol hidrogen yang dapat teradsorpsi per gram NTC lokal yaitu sebesar 3,255, sedangkan pada NTC komersial, jumlah maksimum mmol hidrogen yang dapat teradsorpsi per gramnya lebih kecil daripada NTC lokal yaitu sebesar 2,704. Nilai konstanta b yang didapat dari persamaan model untuk kedua NTC sangat kecil (mendekati nol). Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan adsorpsi gas hidrogen baik pada NTC lokal maupun komersial sangat kecil dipengaruhi oleh interaksi yang terjadi antara molekul hidrogen dengan atom karbon yang terdapat pada NTC, melainkan lebih banyak dipengaruhi oleh banyaknya luas permukaan yang tersedia pada NTC.

4.7. Hasil Dinamika Adsorpsi dan Desorpsi Hidrogen pada NTC

Dinamika adsorpsi dan desorpsi hidrogen pada tekanan rendah dan tekanan tinggi yang terjadi pada kedua NTC dapat dilihat pada Gambar 4.5 dan 4.6.



Gambar 4.5 Data Percobaan Dinamika Adorpsi dan Desorpsi NTC Lokal pada Tekanan 200 dan 900 Psia



Gambar 4.6 Data Percobaan Adorpsi dan Desorpsi NTC Komersial pada Tekanan 200 dan 900 Psia

Sebagaimana terlihat pada Gambar 4.7 dan 4.8 bahwa kesetimbangan adsorpsi baik pada NTC lokal maupun NTC komersial pada tekanan rendah lebih lama bila dibandingkan dengan tekanan tinggi. Hal ini dapat disebabkan karena pada tekanan rendah, difusi efektif yang terjadi pada permukaan atau dalam pori lebih kecil dibandingkan dengan pada tekanan tinggi. Pada adsorben dengan ukuran mikropori seperti nanotube karbon, difusi efektif sangat dipengaruhi oleh difusi Knudsen terutama pada tekanan rendah.

Pada proses desorpsi juga dapat dilihat bahwa kesetimbangan desorpsi dari kedua NTC pada tekanan rendah juga lebih lama dibandingkan pada tekanan tinggi. Hal ini dapat disebabkan pada tekanan rendah, desorpsi hidrogen terjadi pada lapisan dalam pori atau lapisan monolayer dimana molekul hidrogen berinteraksi lebih kuat dengan karbon pada struktur NTC sehingga lebih sulit untuk lepas, sedangkan pada tekanan tinggi, desorpsi dapat terjadi pada molekul hidrogen pada bagian permukaan terluar pori yang jauh interaksinya dengan karbon pada NTC sehingga lebih mudah dilepaskan.

4.8. Representasi Data Dinamika Adsorpsi dan Desorpsi Dengan Model

Dinamika adsorpsi dan desorpsi hidrogen yang terjadi pada NTC lokal dan dan NTC komersial mengikuti mekanisme yang digunakan oleh Gasem dan Robinson (2001) untuk pengujian adsorpsi gas metan, nitrogen dan karbondioksida pada sampel batubara. Model dinamika adsorpsi yang digunakan menggambarkan jumlah fraksi zat yang teradsorpsi sebagai fungsi waktu dan tekanan. Persamaan model dinamika ini dapat dilihat pada persamaan di bawah ini.

$$\theta = \frac{\beta t^\alpha}{1 + \beta t^\alpha} \quad (2.11)$$

$$\alpha = (aP^2 + bP + 0,5)c \quad (2.12)$$

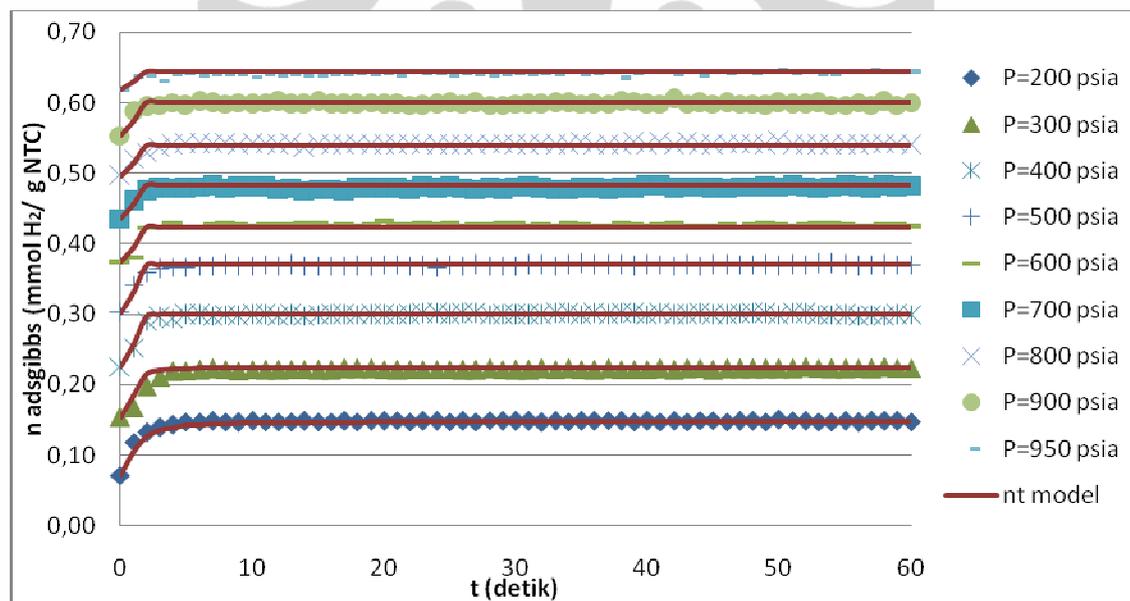
Teta (θ) menggambarkan fraksi zat teradsorpsi pada setiap waktu. Sedangkan harga a, b, c, dan β merupakan konstanta model dinamika adsorpsi yang menggambarkan kecepatan tercapainya kesetimbangan adsorpsi. Besar n zat teradsorpsi model (n_t) pada setiap waktu dihitung dari persamaan berikut:

$$n_t = \theta(n_f - n_i) + n_i \quad (2.13)$$

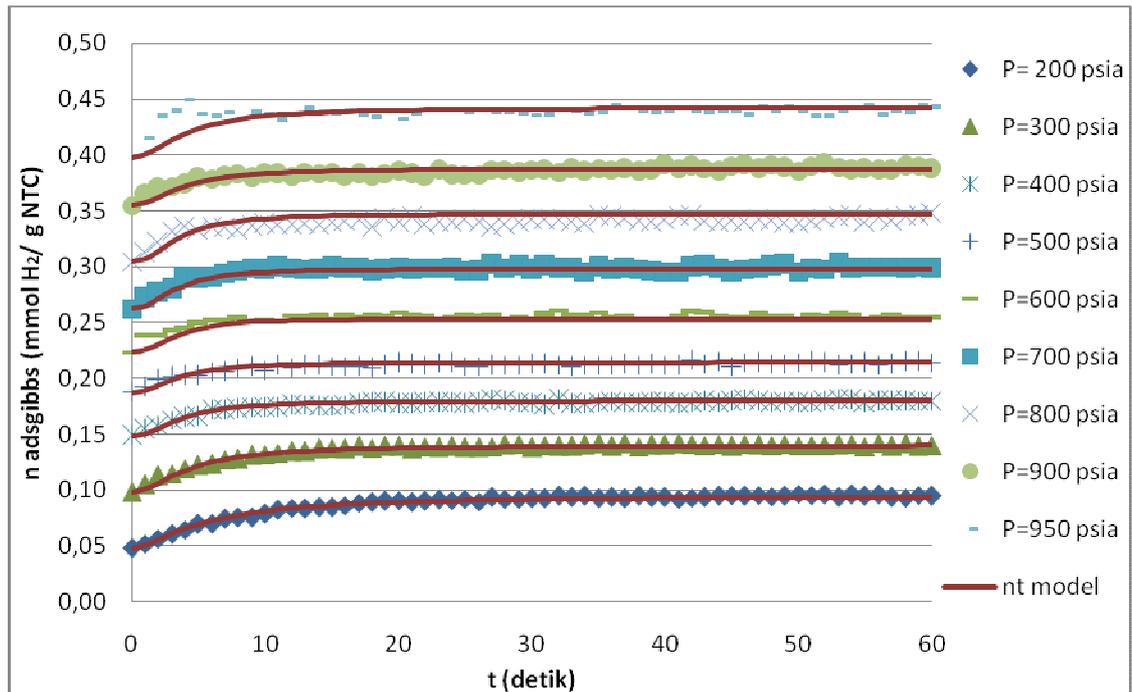
Universitas Indonesia

Jumlah mmol gas hidrogen yang teradsorpsi pada setiap waktu (n_t) dihitung dari awal terjadinya penurunan tekanan pada *sampling cylinder* (P_o) yang menandakan proses adsorpsi mulai terjadi dan diakhiri dengan tercapainya tekanan *sampling cylinder* yang stabil atau tidak berubah secara signifikan (P_f). Begitu pula dengan proses desorpsi, perhitungan jumlah mmol gas hidrogen yang masih teradsorpsi diawali dari mulai terjadinya kenaikan tekanan pada *sampling cylinder* dan diakhiri dengan tercapainya tekanan *sampling cylinder* yang stabil. Tekanan *sampling cylinder* yang stabil atau tidak berubah menandakan telah tercapainya kesetimbangan adsorpsi atau desorpsi dimana harga fraksi teradsorpsinya sama dengan satu ($\theta = 1$). Data dinamika adsorpsi dan desorpsi dari kedua NTC dapat dilihat secara lengkap pada Lampiran 5 dan 6.

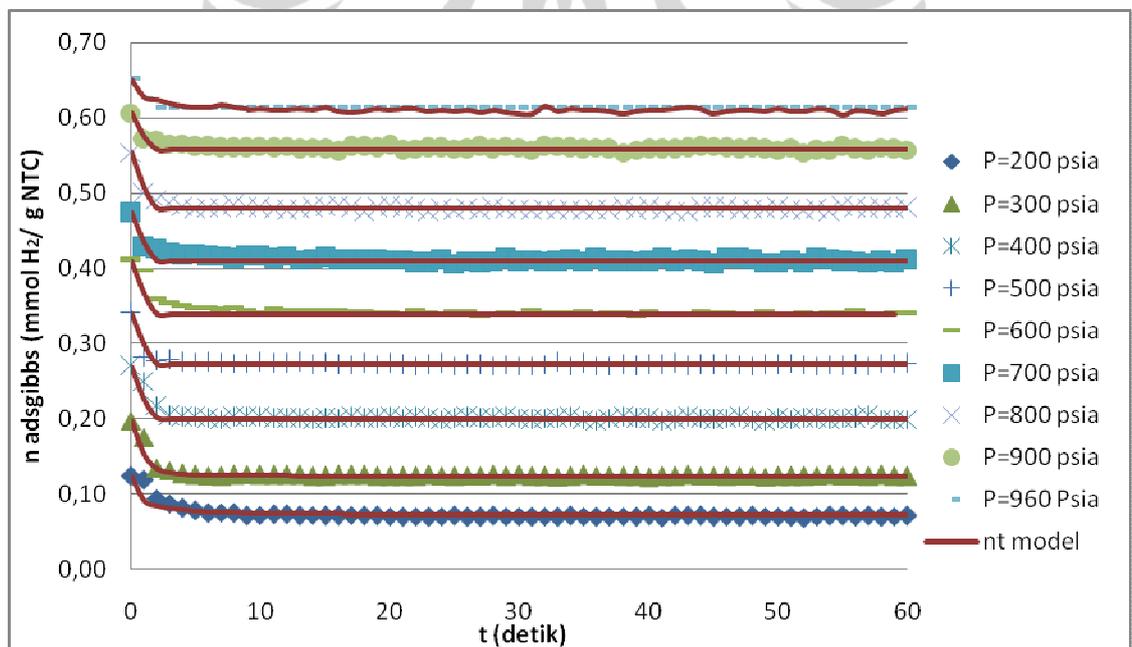
Adapun kurva dinamika adsorpsi dan desorpsi serta kurva permodelannya dari kedua NTC dapat dilihat pada Gambar 4.7, 4.8, 4.9 dan 4.10 di bawah ini..



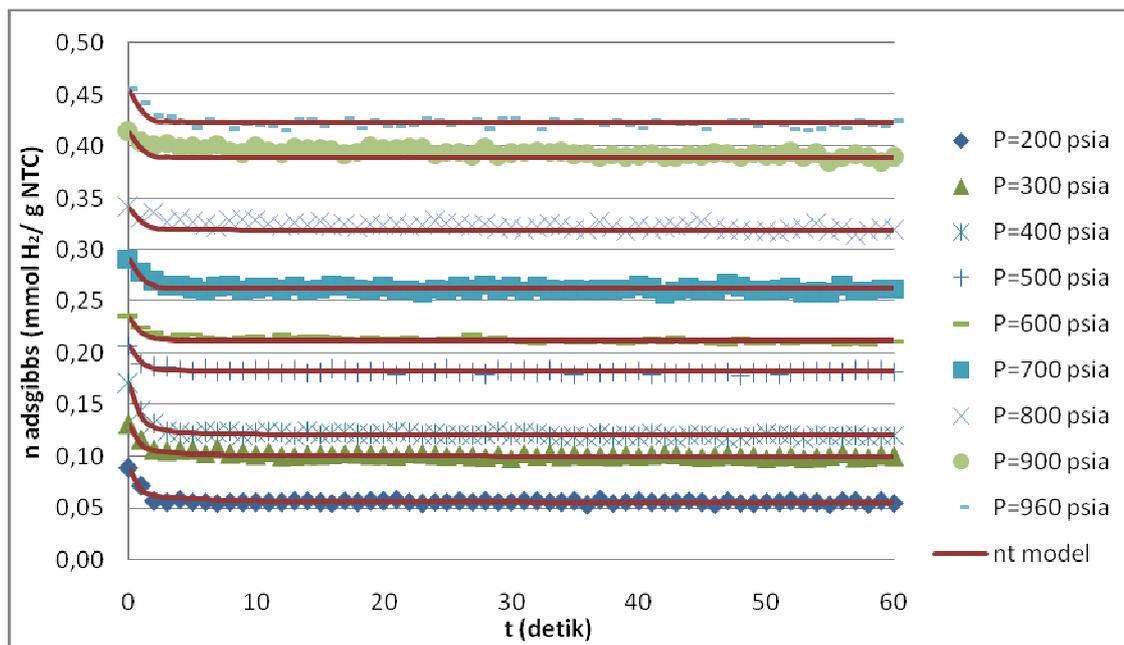
Gambar 4.7 Representasi Model Dinamika Adsorpsi Hidrogen pada NTC Komersial



Gambar 4.8 Representasi Model Dinamika Adsorpsi Hidrogen pada NTC Lokal



Gambar 4.9 Representasi Model Dinamika Desorpsi Hidrogen pada NTC Komersial



Gambar 4.10 Representasi Model Dinamika Desorpsi Hidrogen pada NTC Lokal

Sedangkan parameter model yang dihasilkan dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.6 Parameter Model Dinamika Adsorpsi dan Desorpsi

NTC		β	a	b	c	% AAD
Lokal	Adsorpsi	0,071	-0,045	0,402	1,556	0,976
	Desorpsi	1,803	0,027	0,395	1,053	1,090
Komersial	Adsorpsi	0,746	0,579	0,367	0,831	0,620
	Desorpsi	1,690	0,613	0,250	1,019	0,930

Pada gambar di atas dapat dilihat bahwa dinamika adsorpsi dan desorpsi hidrogen dari kedua NTC dapat direpresentasikan dengan baik oleh model dinamika yang digunakan Gasem dan Robinson. Hal ini juga dapat dilihat dari nilai % AAD yang dihasilkan pada kedua proses tersebut dimana kurang dari 2. NTC lokal memiliki harga konstanta β dan a yang jauh lebih kecil daripada NTC komersial pada proses adsorpsi. Hal ini menunjukkan bahwa kesetimbangan adsorpsi yang terjadi pada NTC lokal lebih lambat daripada NTC komersial, dimana dapat dilihat dari kurva dinamika adsorpsi dari NTC lokal yang lebih *smooth* daripada NTC komersial. Pada proses desorpsi, NTC komersial memiliki harga konstanta β yang sedikit lebih besar dan konstanta a yang berbeda cukup

besar daripada NTC lokal. Hal ini menunjukkan bahwa kesetimbangan desorpsi pada NTC komersial terjadi hampir sama cepat dengan NTC lokal, namun penurunan banyaknya zat yang teradsorpsi sedikit lebih tajam dibandingkan dengan NTC lokal dimana dapat dilihat dari harga konstanta a yang lebih besar.

Konstanta beta (β) yang ditunjukkan pada persamaan model Gasem dan Robinson memiliki arti fisis yang sama dengan konstanta b pada model yang diturunkan secara kinetik oleh Langmuir, dimana harga konstanta b merupakan konstanta kesetimbangan yang menunjukkan perbandingan antara konstanta laju desorpsi terhadap konstanta laju adsorpsi. Dari tabel 4.6 dapat dilihat bahwa konstanta β yang dihasilkan pada permodelan dinamika desorpsi pada kedua NTC lebih besar daripada dinamika adsorpsinya. Hal ini sesuai dengan proses yang terjadi pada desorpsi dimana laju gas hidrogen untuk lepas dari permukaan atau pori NTC jauh lebih besar dibandingkan dengan laju penyerapannya.

Secara keseluruhan baik pada NTC lokal maupun komersial, kesetimbangan adsorpsi dan desorpsi pada tekanan rendah sampai tekanan tinggi terjadi sangat cepat. Hal ini dapat terlihat jelas pada tekanan tertinggi pengujian (960 Psia), dimana harga teta, θ (dapat dilihat pada Lampiran 4 dan 5) pada proses adsorpsi untuk NTC lokal mendekati 1 (yaitu 0,974) pada waktu 30 detik dan untuk NTC komersial kesetimbangannya lebih cepat tercapai, yaitu pada waktu 2 detik dengan harga teta 1. Sedangkan pada proses desorpsi, kesetimbangan tercapai pada waktu 27 detik untuk NTC lokal dan 2 detik untuk NTC komersial.

Kesetimbangan adsorpsi dan desorpsi yang sangat cepat ini juga dapat mengindikasikan bahwa pemasukan dan pelepasan gas pada sistem penyimpanan hidrogen dalam penelitian ini lebih banyak dipengaruhi oleh proses adsorpsi dan desorpsi yang terjadi pada permukaan aktif NTC dibandingkan dengan mekanika fluida dan fenomena perpindahan gas yang terjadi pada sepanjang tabung penyimpanan. Kemudahan dalam menyerap dan melepas gas hidrogen dari kedua NTC sangat menguntungkan dalam aplikasinya sebagai penyimpan gas hidrogen untuk bahan bakar.