

# Pengembangan katalis nikel-itrium oksida untuk konversi furfural sebagai senyawa turunan biomassa menjadi 1,5-pentanediol

Husni Wahyu Wijaya<sup>1</sup>, Shogo Shimazu<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Malang

<sup>2</sup> Graduate School of Engineering, Chiba University

E-mail: husni.wahyu.fmipa@um.ac.id

## Abstrak

Hydrogenolisis furfural (FFR) yang diketahui sebagai senyawa turunan biomassa menjadi 1,5-pentanediol (1,5-PeD) merupakan salah satu rute penting dalam rangka menjaga kesinambungan bahan kimia. Pengembangan katalis nikel-itrium oksida untuk hydrogenolisis FFR menjadi 1,5-PeD telah berhasil disintesis dengan dua perlakuan berbeda. Katalis Ni-Y(n)HT disintesis dengan reduksi langsung dari campuran nikel-itrium hidroksidanya. Campuran nikel-itrium hidroksidanya dari prosedur preparasi yang sama dilakukan kalsinasi sebagai *pretreatment* sebelum proses reduksi dengan gas hydrogen dan diperoleh katalis Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(n)T. Kedua jenis katalis yang sudah tereduksi tersebut mempunyai tersusun atas nikel(0) dan itrium oksida tetapi kristalinitas keduanya berbeda. Perbedaan juga ditunjukkan pada kinerja katalisis dalam menghasilkan 1,5-PeD dari FFR. Kedua jenis katalis menunjukkan perilaku katalisis yang serupa dan antar muka Ni(0)-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diduga sebagai situs aktif untuk pemutusan ikatan C-O dari cincin furan.

**Kata-kata kunci:** Hydrogenolisis, katalis Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1,5-pentanediol.

## Abstract

*Hydrogenolysis of biomass-derived furfural (FFR) to 1,5-pentanediol (1,5-PeD) is a critical route for sustaining fine chemicals. Development of nickel-yttrium oxide catalysts has been successfully synthesized with two different treatments. The first catalyst, Ni-Y(n)HT catalyst, was synthesized by direct reduction from nickel-yttrium hydroxides mixture. The mixture of nickel-yttrium hydroxides from the same preparation procedure was calcined as a pretreatment and subsequently reduced using hydrogen gas giving Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(n)T catalyst. The reduced catalysts consist of nickel(0) and yttrium oxide with the difference in crystallinity. The difference in catalytic performance between both type catalysts showed in the production of 1,5-PeD from hydrogenolysis of FFR. Catalytic behavior of catalysts is similar and Ni(0)-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> boundaries is critical for cleavage C-O bond of furan ring.*

**Keywords:** Hydrogenolysis, Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst, 1,5-pentanediol

## PENDAHULUAN

Transformasi furfuraldehida (FFR) menjadi 1,5-pentanediol (1,5-PeD) melalui dua konsekutif reaksi, hidrogenasi dan hidrogenolisis, merupakan rute reaksi yang sangat penting. Penelitian tentang produksi dan sintesis 1,5-PeD dari FFR yang telah dilaporkan umumnya menggunakan logam mulia (Rh, Pd, dan Ir) berpendukung.<sup>1</sup> Pengembangan katalis sebagai pengganti logam mulia untuk reaksi ini menjadi sangat kompetitif dari aspek keilmuan dan teknologi. Secara teori, logam atau senyawa kompleks yang memfasilitasi pembentukan spesi hidrida dari molekul hidrogen dapat

diperkerjakan untuk reaksi hidrogenasi maupun hidrogenolisis. Diantara logam-logam transisi, nikel menjadi kandidat reaksi hidrogenolisis FFR menjadi 1,5-PeD karena murah dan ramah lingkungan. Pengembangan katalis berbasis nikel dalam studi ini adalah dengan penambahan logam elektropositif yang mampu berinteraksi dengan atom oksigen dari produk terhidrogenasi untuk memulai reaksi hidrogenolisis. Penambahan logam elektropositif seperti itrium dalam bentuk itrium oksida ke nikel (katalis Ni-Y dan Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) telah dilaporkan untuk mengkatalisis pembentukan 1,5-PeD dari FFR, furfural alkohol (FFA), dan tetrahidrofurfural

alkohol (THFA).<sup>2-4</sup> Laporan ini mengemukakan peningkatan aktivitas katalisis pada transformasi FFR menjadi 1,5-PeD menggunakan Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebagai akibat dari pengaruh dari kalsinasi sebagai *pretreatment*.

## METODE

Campuran nikel hidroksida dan itrium hidroksida disintesis dengan kombinasi metode *co-precipitation* dan *hydrothermal*.<sup>2,3</sup> Secara singkat dituliskan sebagai berikut, campuran larutan Y(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> dan Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> dengan rasio mol Ni/Y (*n*) adalah 1.5, 2.5, dan 3.0 dan diendapkan pada pH 13,2 dengan penambahan NaOH 3,1 M. Campuran endapan dipindahkan ke *bomb hydrothermal* untuk dipanaskan pada 423 K selama 24 jam [2] [3]. Serbuk hijau diperoleh dengan cara dengan cara filtrasi dari larutan campuran hasil *hydrothermal* yang dilanjutkan dengan pencucian dengan air suling sampai netral, dan dikeringkan dengan cara *di-vacuum* selama 12 jam.

Serbuk hijau (campuran hidroksida dari itrium dan nikel) digunakan untuk preparasi katalis Ni-Y(*n*) dan Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(*n*). Preparasi katalis Ni-Y(*n*) adalah dengan mereduksi serbuk hijau menggunakan gas hidrogen menggunakan peralatan *hydrogen treatment* (HT) pada 548 K, 573 K, atau 673 K selama 4-5 jam. Katalis yang digunakan untuk reaksi katalisis dinotasikan sebagai Ni-Y(*n*)HT (*n* = rasio mol Ni/Y dan HT = suhu *hydrogen treatment* (HT) dalam K).

Katalis Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(*n*) dipreparasi dengan kalsinasi serbuk hijau sebagai *pretreatment* sebelum proses reduksi menggunakan peralatan *hydrogen treatment* (HT) pada 673 K. Tahap kalsinasi dilakukan pada berbagai suhu yaitu 623 K, 773 K, 923 K, atau 1073 K. Campuran oksida berwarna hitam dari tahap kalsinasi direduksi dengan gas hidrogen pada 673 K. Katalis jenis ini dinotasikan dengan Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(*n*)T (*n* = rasio mol Ni/Y dan T = suhu kalsinasi dalam K).

Profil komponen dari kedua jenis katalis dikarakterisasi dengan menggunakan XRD. Pengambilan data XRD dikoleksi dengan menggunakan mesin Miniflex 600 Rigaku dengan Cu sebagai sumber radiasi *K $\alpha$*  ( $\lambda = 1,5444$  nm).

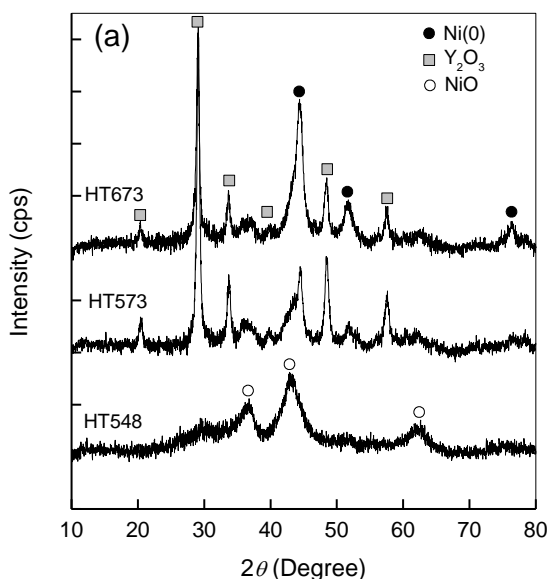
Uji katalitik hidrogenolisis FFR menjadi 1,5-

PeD dengan katalis Ni-Y(*n*)HT dan Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(*n*)T dilakukan dalam reaktor *steel autoclave* bervolume 30 mL yang dilengkapi dengan pengukur tekanan. Komposisi dari katalis, reaktan, dan pelarut pada pengujian katalisisnya adalah katalis (0,05 g) dimasukkan dalam tabung reaksi yang berisi magnet pengaduk kemudian ditambahkan substrat (1,1 mmol), 2-propanol (3 mL), dan *trans*-dehidronaptalena (0,07 g) sebagai standar. Tabung reaksi tersebut dimasukkan kedalam reaktor dan diberikan gas hidrogen sebanyak 2 MPa yang selanjutnya dipanaskan pada 423 K selama 24 jam. Reaksi katalisis dihentikan setelah 24 jam dengan mendinginkan reaktor dalam bejana es dan gas bertekanan dikeluarkan secara perlahan. Tabung reaksi yang berisi campuran larutan disentrifugasi untuk memisahkan larutan dengan katalis. Larutan hasil reaksi dianalisis dengan gas kromatografi (GC) yang dilengkapi dengan kolom kapiler dan detektor FID.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hydrogenolysis Furfural (FFR) menggunakan katalis Ni-Y(*n*)HT

Pola XRD dari katalis Ni-Y(2.5)HT dengan variasi suhu HT ditunjukkan pada Gambar 1. Kenaikan suhu HT pada Ni-Y(2.5) berdampak pada kenaikan kristalinitas Ni(0) maupun Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang ditunjukkan dengan bertambahnya intensitas. Pembentukan Ni(0) dan Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dapat dikonfirmasi dari pengukuran ini yang mengacu pada induk data ICSD #646092 dan ICSD #647653. Nikel(II) oksida (NiO) terbentuk ketika HT dilakukan pada 548 K (katalis Ni-Y(2.5)HT548). Hal ini menunjukkan bahwa nikel(II) hidroksida dalam sampel Ni-Y tidak tereduksi menjadi Ni(0) pada suhu 548 K dengan metode reduksi yang digunakan. Hasil ini senada dengan penelitian kami sebelumnya, puncak Ni(0) diperoleh ketika Ni-Y direduksi pada 573 K.<sup>2</sup> Katalis Ni-Y(1.5)HT573 dan Ni-Y(3.0)HT573 mempunyai pola XRD yang identik dengan Ni-Y(2.5)HT573 yaitu menghasilkan Ni(0) dan Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> karena suhu HT pada 573 K cukup untuk mereduksi Ni(OH)<sub>2</sub> dan NiO menjadi Ni(0). Pola XRD dari Itrium oksida (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) yang berasosiasi ICSD #647653 menunjukkan bahwa Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mempunyai bentuk



**Gambar 1.** Pola XRD dari Ni-Y(2.5) pada berbagai suhu *hydrogen treatment* (HT)

Kinerja dari katalis Ni-Y(*n*)HT untuk hidrogenolisis FFR menjadi 1,5-PeD ditunjukkan pada Tabel 1. FFR terkonversi sempurna pada semua variasi rasio Ni/Y dan suhu HT dengan produk yang teridentifikasi setelah 72 jam adalah THFA, 1,5-PeD, dan 1,2-PeD. Rasio Ni/Y pada 2,5 dengan suhu HT 573 K (Ni-Y(2.5)HT573) menghasilkan 1,5-PeD paling tinggi (46% yield) dibandingkan dengan menggunakan katalis Ni-Y(1.5)HT573 dan Ni-Y(3.0)HT573 (entri 1-3). Variasi suhu HT (548 K, 573 K, dan 673 K) juga menunjukkan bahwa katalis Ni-Y(2.5)HT573 mempunyai kinerja paling baik pada pembentukan 1,5-PeD dari FFR (entri 2, 4-5). Prekursor katalis Ni-Y(*n*)HT seperti Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO, dan Ni(0) termasuk Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(2.5)pm hanya menghasilkan 1,5-PeD kurang dari 14% yield (entri 6-9). Hasil eksperimen tersebut mengindikasikan bahwa antar muka Ni(0)-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada katalis Ni-Y(*n*)HT sangat esensial.

Investigasi kondisi reaksi katalitik yang optimum dilakukan dengan memvariasi suhu dan tekanan gas H<sub>2</sub> untuk katalis Ni-Y(2.5)HT573. Kenaikan suhu reaksi menjadi 433 K dan 443 K pada tekanan H<sub>2</sub> sebesar 2,0 MPa menghasilkan 1,5-PeD kurang dari 46%. Hal senada juga terjadi ketika tekanan gas H<sub>2</sub> dinaikkan menjadi 3,0 MPa pada suhu reaksi 423 K. Eksperimen ini menunjukkan bahwa kondisi optimum untuk hidrogenolisis FFR menjadi 1,5-PeD adalah 2,0 MPa H<sub>2</sub> dan 423 K menggunakan katalis Ni-Y(2.5)HT573.

Hasil penelitian ini masih lebih masih lebih rendah jika dibandingkan dengan katalis Pd(0.66

wt%)-Ir-ReOx/SiO<sub>2</sub> yang menghasilkan 1,5-PeD sampai 71,4 % dari FFR pada 373 K dan 6 MPa H<sub>2</sub>.<sup>5</sup> Walaupun demikian, katalis Ni-Y(2.5)HT573 masih unggul dari aspek logam Ni yang murah dan ramah lingkungan serta tekanan gas H<sub>2</sub> hanya 2 MPa.

**Tabel 1.** Aktivitas katalitik dari Ni-Y katalis pada hidrogenolisis FFR

Entri	Katalis <sup>a</sup>	C <sup>c</sup> (%)	Yield (%)		
			THFA	1,5-PeD	1,2-PeD
1.	Ni-Y(1.5)HT573	>99	85	12	2
2.	Ni-Y(2.5)HT573	>99	39	46	2
3.	Ni-Y(3.0)HT573	>99	84	11	0
4.	Ni-Y(2.5)HT548	>99	77	18	2
5.	Ni-Y(2.5)HT673	>99	85	13	2
6.	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	98	0	0	0
7.	NiO	99	9	14	0
8.	Ni(0)	>99	87	4	1
9.	Ni-Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (2.5)pm <sup>b</sup>	>99	82	13	2

<sup>a</sup> Kondisi reaksi: Katalis Ni-Y (0,05 g), substrat (1,1 mmol), *trans*-dekahidronaftalena (0,07 g), 2-propanol (3 mL), tekanan H<sub>2</sub> (2,0 MPa), 423 K, selama 72 jam. <sup>b</sup> pm = *physical mixing*. <sup>c</sup> C = konversi.

Profil waktu dari transformasi FFR menjadi 1,5-PeD pada kondisi optimum ditunjukkan di Gambar 2. Awal reaksi (kurang dari 2 jam), FFR terkonversi menjadi FFA dan THFA. Perpanjangan waktu tidak hanya menyebabkan FFA terhidrogenasi menjadi THFA tetapi juga terhidrogenolisis menjadi 1,2-PeD. Setelah 3 jam reaksi berlangsung, THFA terbentuk secara optimum dan berkurang secara kontinyu dengan perpanjangan waktu reaksi. Hal itu karena THFA terhidrogenolisis menjadi 1,5-PeD yang ditunjukkan dengan peningkatan persen yieldnya. Pembentukan 1,2-PeD tidak berubah dari rentang waktu 3 sampai 72 jam karena FFA sudah terkonversi sempurna menjadi THFA dalam waktu 3 jam dan THFA hanya terhidrogenolisis menjadi 1,5-PeD.

### Hydrogenolysis Furfural (FFR) menggunakan katalis Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(*n*)T

Pola XRD katalis Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(2.5)T yang ditunjukkan pada Gambar 3. Perlakuan kalsinasi sebagai *pretreatment* menghasilkan NiO dan Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Gambar 3(A)) [5]. Pola XRD dari sampel Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(2.5)T yang terkalsinasi mengandung puncak-puncak 2θ pada 37,2; 43,3; 62,9; 75,3; dan 79,4° yang teridentifikasi sebagai NiO (ICSD #53931). Kristalin Itrium oksida (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) terbentuk pada kalsinasi 923 K dan 1073 K sedangkan kalsinasi dibawah suhu tersebut cenderung menghasilkan Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang amorf. Data

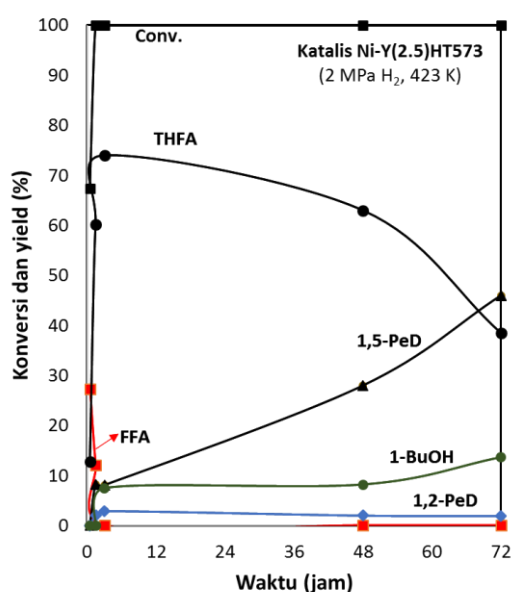
ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilaporkan oleh Liu, dkk.<sup>6</sup> Reduksi melalui HT pada 673 K hanya mereduksi NiO menjadi Ni(0) dan meningkatkan kristalinitas  $Y_2O_3$  sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3(B). Perbedaan perlakuan ini berdampak pada kristalinitas dari katalis Ni- $Y_2O_3(2.5)T$  yang lebih baik daripada Ni- $Y(2.5)HT$  dan diharapkan mempunyai performa katalitik yang lebih baik.

Aktivitas katalitik dari katalis Ni- $Y_2O_3(2.5)T$  yang telah direduksi untuk transformasi FFR menjadi 1,5-PeD ditunjukkan pada Tabel 2. FFR terkonversi sempurna untuk semua katalis yang diujikan pada 423 K dan 2 MPa  $H_2$  setelah 24 jam. Hidrogenolisis FFR dengan menggunakan katalis Ni- $Y_2O_3(n)623$  (untuk  $n = 1,5; 2,5; 3,0$ ) menghasilkan 1,5-PeD tidak lebih dari 24% yield terutama untuk katalis Ni- $Y_2O_3(2.5)623$  (entri 1-3). Optimasi katalis tersebut dengan variasi suhu kalsinasi pada *pretreatment* tidak meningkatkan pembentukan 1,5-PeD (entri 2, 4-6). Fenomena serupa juga terjadi jika menggunakan katalis Ni- $Y_2O_3(2.5)623pm$  yang dicampurkan secara fisik (entri 7). Hasil eksperimen ini memperkuat hipotesis sebelumnya bahwa pemutusan ikatan C-O dari furan ring terjadi pada antar muka Ni(0)- $Y_2O_3$  baik pada katalis Ni- $Y_2O_3(2.5)623$  maupun katalis Ni- $Y(n)HT$ .

Variasi suhu reaksi dan tekanan gas  $H_2$  juga dilakukan investigasi untuk mendapatkan kondisi

optimal dari katalis Ni- $Y_2O_3(2.5)623$ . Kenaikan suhu reaksi menjadi 433 K dan 453 K (tekanan  $H_2$  tetap 2 MPa) meningkatkan yield 1,5-PeD secara tidak signifikan akan tetapi kenaikan 1-butanol sebagai hasil samping meningkat secara drastis sampai 20% yield. Kenaikan tekanan  $H_2$  menjadi 3 MPa tidak meningkatkan yield dari 1,5-PeD. Data penelitian ini serupa dengan penelitian sebelumnya dengan katalis Ni- $Y(2.5)HT$ , yaitu kondisi optimum dari kinerja katalitik FFR menjadi 1,5-PeD dengan katalis Ni- $Y_2O_3(2.5)623$  adalah 2 MPa pada 423 K.

Kinerja katalitik dari Ni- $Y_2O_3(2.5)623$  juga dipantau waktu reaksinya pada kondisi optimalnya. Pola reaksi yang terjadi pada waktu reaksi mirip dengan yang terjadi pada hidrogenolisis FFR dengan katalis Ni- $Y(2.5)HT573$  yaitu hidrogenasi FFR menjadi FFA dan THFA yang diikuti dengan hidrogenolisis FFA menjadi 1,2-PeD dan THFA menjadi 1,5-PeD. Pada rentang waktu reaksi 3-24 jam hanya terjadi hidrogenolisis THFA menjadi 1,5-PeD karena THFA terbentuk sebagai produk tunggal dari hidrogenasi FFR. Perpanjangan waktu reaksi dari 24 jam sampai 72 jam hanya menghasilkan peningkatan yield 1,5-PeD sampai 38%. Hal ini mengindikasikan terjadinya deaktivasi katalis setelah 24 jam waktu reaksi.



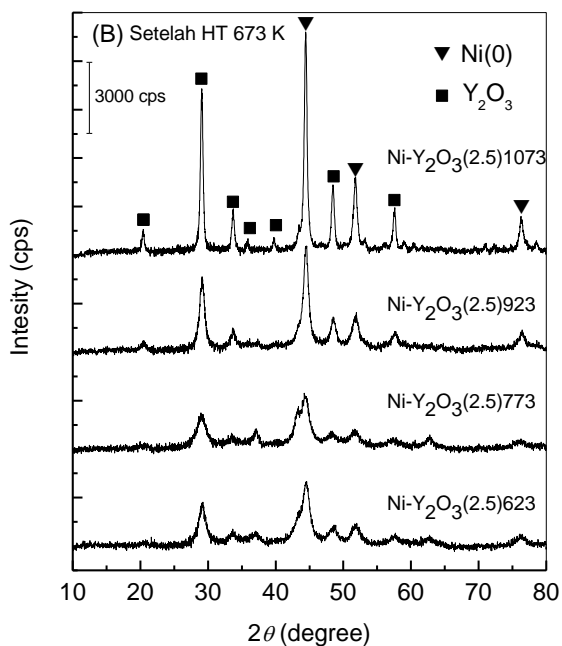
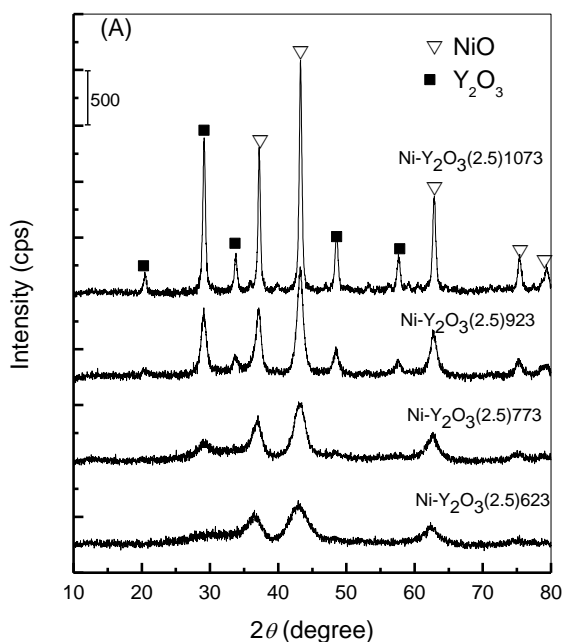
Kondisi reaksi: Katalis Ni-Y (0,05 g), substrat (1,1 mmol), *trans*-dekahidronaphtalena (0,07 g), dan 2-propanol (3 mL).

Gambar 2. Profil waktu untuk hidrogenolisis FFR menggunakan katalis Ni- $Y(2.5)HT573$ .

Tabel 2. Aktivitas katalitik dari Ni- $Y_2O_3$  katalis pada hidrogenolisis FFR

Entri	Katalis <sup>a</sup>	Yield (%)		
		THFA	1,5-PeD	1,2-PeD
1.	Ni- $Y_2O_3(1.5)623$	85	14	1
2.	Ni- $Y_2O_3(2.5)623$	57	28	2
3.	Ni- $Y_2O_3(3.0)623$	91	0	0
4.	Ni- $Y_2O_3(2.5)773$	63	13	2
5.	Ni- $Y_2O_3(2.5)923$	80	10	3
6.	Ni- $Y_2O_3(2.5)1073$	86	10	3
7.	Ni- $Y_2O_3(2.5)623pm$	74	12	2

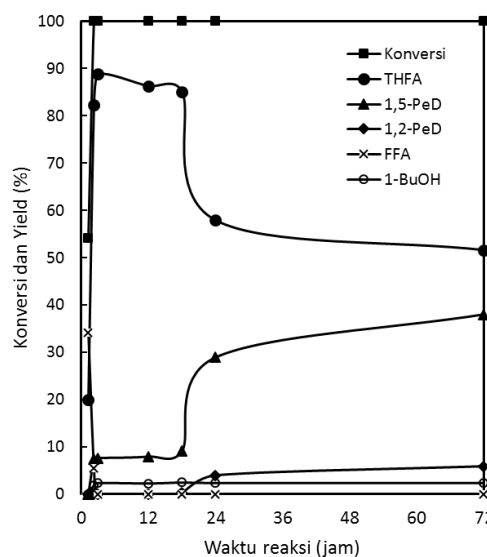
<sup>a</sup> Kondisi reaksi: Katalis Ni-Y (0,05 g), substrat (1,1 mmol), *trans*-dekahidronaphtalena (0,07 g), 2-propanol (3 mL), tekanan  $H_2$  (2,0 MPa), 423 K, selama 72 jam. <sup>b</sup> pm = *physical mixing*. <sup>c</sup> C = konversi.



Gambar 3. Pola XRD dari katalis Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(2.5)T pada berbagai suhu kalsinasi (A) sebelum direduksi dan (B) setelah direduksi pada 673 K

## DAFTAR RUJUKAN

- 1 Y. Nakagawa, M. Tamura and K. Tomishige, Catalytic Conversions of Furfural to Pentanediols, *Catal. Surv. from Asia*, 2015, **19**, 249–256.
- 2 H. W. Wijaya, T. Sato, H. Tange, T. Hara, N. Ichikuni and S. Shimazu, Hydrogenolysis of Furfural into 1,5-Pentanediol by Employing Ni-M (M = Y or La) Composite Catalysts, *Chem. Lett.*, 2017, **46**, 744–746.



Kondisi reaksi: Katalis Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(2.5)623 (0,05 g), substrat (1,1 mmol), *trans*-dekahidronaftalena (0,07 g), dan 2-propanol (3 mL).

Gambar 4. Profil waktu untuk hidrogenolisis FFR menggunakan katalis Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(2.5)623.

## KESIMPULAN

Katalis nikel-itrium oksida telah berhasil disintesis dengan dua perlakuan yang berbeda. Perbedaan perlakuan tersebut tidak hanya menunjukkan perbedaan pada kristalinitas dari komponen-komponen penyusun katalisnya tetapi juga kinerja katalitiknya pada hidrogenolisis FFR menjadi 1,5-PeD. Hasil eksperimen ini menunjukkan bahwa katalis Ni-Y(2.5)HT573 mempunyai durabilitas yang lebih baik daripada katalis Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(2.5)623. Katalis Ni-Y(2.5)HT573 menghasilkan 1,5-PeD sebanyak 46% yield sedangkan katalis Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(2.5)623 hanya 38% yield setelah 72 jam pada kondisi optimal reaksi katalisis (2 MPa H<sub>2</sub> dan 432 K).

- 3 H. W. Wijaya, T. Kojima, T. Hara, N. Ichikuni and S. Shimazu, Synthesis of 1,5-Pentanediol by Hydrogenolysis of Furfuryl Alcohol over Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Catalyst, *ChemCatChem*, 2017, **9**, 2869–2874.
- 4 H. W. Wijaya, T. Hara, N. Ichikuni and S. Shimazu, Hydrogenolysis of Tetrahydrofurfuryl Alcohol to 1,5-Pentanediol over a Nickel-Yttrium Oxide Catalyst Containing Ruthenium, *Chem. Lett.*, 2018, **47**, 103–106.

- 5 S. Liu, Y. Amada, M. Tamura, Y. Nakagawa and K. Tomishige, One-pot selective conversion of furfural into 1,5-pentanediol over a Pd-added Ir–ReO<sub>x</sub>/SiO<sub>2</sub> bifunctional catalyst, *Green Chem.*, 2014, **16**, 617.
- 6 H. Liu, H. Wu and D. He, Methane conversion to syngas over Ni/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts - Effects of calcination temperatures of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on physicochemical properties and catalytic performance, *Fuel Process. Technol.*, 2014, **119**, 81–86.