PIROLIZ C_4 FRAKSIYALARIDAN 1,3-BUTADIENNI IKKI BOSQICHLI EKSTRAKTIV REKTIFIKATSIYA ASOSIDA AJRATISH JARAYONINI MODELLASHTIRISH VA TAJRIBAVIY TADQIQ ETISH

Ibodullayev Muxriddin Xudoyor og‘li
Qarshi davlat texnika universiteti katta o‘qituvchisi
E-mail: muhribo.info@gmail.com
Norqulov Jonibek Farxod o‘g‘li
Qarshi davlat texnika universiteti katta o‘qituvchisi
E-mail: jnbnorkulov@gmail.com
Abduraxmonov Olim Rustamovich
Buxoro davlat texnika universiteti professori
E-mail: azi100@mail.ru
Kodirov Orifjon Sharipovich
O‘zbekiston milliy universiteti
E-mail: oqsh@bk.ru

Annotatsiya. Piroliz jarayonidan olinadigan C_4 fraksiyalaridan 1,3-butadienni ajratish murakkab texnologik muammo bo‘lib, u aralashmaning ko‘p komponentli tarkibi va uglevodorodlarning qaynash haroratlari bir-biriga yaqinligi bilan bog‘liq. Ushbu ishda 1,3-butadienni samarali ajratish maqsadida atsetonitril–suv erituvchisi asosida ikki bosqichli ekstraktiv rektifikatsiya jarayoni ishlab chiqildi va modellashtirildi. Jarayon Aspen Plus dasturiy muhitida simulyatsiya qilindi hamda yarim sanoat miqyosidagi tajriba qurilmasida sinovdan o‘tkazildi. Xomashyo sifatida pirolizdan olingan C_4 fraksiyasi ishlatildi va uning tarkibi GC–FID yordamida aniqlandi. Boshlang‘ich MIXED oqimda 1,3-butadienning ulushi taxminan 40 % ni tashkil etgani aniqlanib, bu ajratish jarayonining yuqori yuklama sharoitida olib borilishini ko‘rsatdi. Ikki bosqichli ekstraktiv rektifikatsiya natijasida 2-kolonna kub qoldig‘i (BTM2) oqimida 1,3-butadienning konsentratsiyasi 63 % dan ortiq darajaga yetdi, bu esa jarayonning boyitish qobiliyatini tasdiqlaydi. Olingan natijalar ikki bosqichli ekstraktiv rektifikatsiya piroliz C_4 oqimlaridan 1,3-butadienni samarali ajratish va kontsentratsiyalash uchun mos texnologik asos ekanini ko‘rsatadi.

Kalit so‘zlar: 1,3-butadien, ekstraktiv rektifikatsiya, piroliz C_4 fraksiyasi, gaz xromatografiyasi (GC–FID).

Аннотация. Разделение 1,3-бутадиена из C_4-фракций, получаемых в процессе пиролиза, представляет собой сложную технологическую задачу, обусловленную многокомпонентным составом смеси и близкими температурами кипения углеводородов. В данной работе с целью эффективного выделения 1,3-бутадиена был разработан и смоделирован

ISSN 3030-3907

двухстадийный процесс экстрактивной ректификации с использованием растворителя на основе ацетонитрила и воды. Процесс был смоделирован в программной среде Aspen Plus и испытан на полупромышленной экспериментальной установке. В качестве сырья использовалась C_4-фракция, полученная при пиролизе, состав которой был определён методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектированием (GC–FID). Установлено, что в исходном потоке MIXED содержание 1,3-бутадиена составляет около 40 %, что указывает на работу процесса при высокой нагрузке. В результате двухстадийной экстрактивной ректификации концентрация 1,3-бутадиена в кубовом остатке второй колонны (BTM2) превысила 63 %, что подтверждает способность процесса к эффективному обогащению целевого компонента. Полученные результаты показывают, что двухстадийная экстрактивная ректификация является технологически обоснованной основой для разделения и концентрирования 1,3-бутадиена из пиролизных C_4-потоков.

Ключевые слова: 1,3-бутадиен, экстрактивная ректификация, пиролизная C_4-фракция, газовая хроматография (GC–FID).

Abstract. The separation of 1,3-butadiene from pyrolysis-derived C_4 fractions is a complex technological challenge due to the multicomponent nature of the mixture and the close boiling points of hydrocarbons. In this study, a two-stage extractive distillation process based on an acetonitrile–water solvent system was developed and modeled for the efficient separation of 1,3-butadiene. The process was simulated using Aspen Plus and tested on a semi-industrial experimental unit. A pyrolysis-derived C_4 fraction was used as feedstock, and its composition was determined by gas chromatography with flame ionization detection (GC–FID). The initial MIXED stream was found to contain approximately 40% 1,3-butadiene, indicating high-load separation conditions. As a result of the two-stage extractive distillation process, the concentration of 1,3-butadiene in the second column bottom stream (BTM2) exceeded 63%, confirming the enrichment capability of the process. The obtained results demonstrate that two-stage extractive distillation provides a suitable technological basis for the efficient separation and concentration of 1,3-butadiene from pyrolysis C_4 streams.

Keywords: 1,3-Butadiene, extractive distillation, pyrolysis C_4 fraction, gas chromatography (GC–FID).

KIRISH

Piroliz jarayonlari natijasida olinadigan C_4 uglevodorod fraksiyalari sanoat uchun muhim xomashyo hisoblanadi, chunki ularning tarkibida sintetik kauchuklar, plastmassalar va yuqori molekulyar polimerlar ishlab chiqarishda

ISSN 3030-3907

asosiy monomer bo‘lgan 1,3-butadien mavjud. Biroq pirolizdan chiqadigan C_4 oqimlari ko‘p komponentli bo‘lib, ularning tarkibida 1,3-butadien bilan bir qatorda propilen, butanlar, butenlar, MAPD fraksiyasi (metilatsetilen va propadien) hamda og‘irroq C_5 komponentlar mavjud bo‘ladi [1]. Gaz xromatografik tahlillar (S-1401 va FB-1 namunalar) ushbu oqimda 1,3-butadienning ulushi taxminan 40 % atrofida ekanini ko‘rsatadi, bu esa ajratish jarayonining yuqori yuklama va murakkab fazaviy muvozanat sharoitlarida kechishini bildiradi [2].

ADABIYOTLAR TAHLILI

Bunday ko‘p komponentli tizimlarda oddiy rektifikatsiya usullari 1,3-butadienni yetarli darajada selektiv ajratib bera olmaydi, chunki C_4 uglevodorodlarning qaynash haroratlari bir-biriga juda yaqin va nisbiy uchuvchanlik past bo‘ladi. Shu sababli sanoat amaliyotida ekstraktiv rektifikatsiya keng qo‘llaniladi [3]. Bu jarayonda tanlangan erituvchi (ekstragent) aralashmaning fazalararo muvozanatini o‘zgartirib, maqsad komponent 1,3-butadienning nisbiy uchuvchanligini oshiradi va uni boshqa uglevodorodlardan samaraliroq ajratish imkonini beradi. Atsetonitril asosidagi erituvchilar 1,3-butadien bilan kuchli selektiv o‘zaro ta’sirga kirishishi sababli ushbu jarayon uchun eng mos solventlardan biri hisoblanadi [4,5].

Biroq ekstraktiv rektifikatsiya samaradorligi ko‘plab omillarga, jumladan erituvchi/xom ashyo nisbati, flegmalar soni, bosim, harorat profili va fazalararo muvozanat sharoitlariga kuchli bog‘liq. Ayniqsa, og‘ir C_5 komponentlarning mavjudligi kolonnaning pastki qismidagi suyuqlik yuklanishini oshirib, modda almashinish jarayoniga salbiy ta’sir ko‘rsatishi mumkin [6]. Shu sababli, bunday murakkab aralashmalarni ajratishda ikki bosqichli ekstraktiv rektifikatsiya sxemalaridan foydalanish texnologik jihatdan afzal hisoblanadi, chunki bu yondashuv ajratish vazifasini kolonnalar o‘rtasida taqsimlab, selektivlik va barqarorlikni oshirish imkonini beradi [7].

Ushbu ishda pirolizdan olingan C_4 fraksiyalaridan 1,3-butadienni ajratish uchun atsetonitril–suv erituvchisi asosida ikki bosqichli ekstraktiv rektifikatsiya jarayoni o‘rganiladi. Jarayon Aspen Plus dasturiy muhitida modellashtirilgan va yarim sanoat miqyosidagi tajriba qurilmasida tekshirilgan. Kirish oqimlari tarkibi, erituvchi/xom ashyo nisbati, flegmalar soni hamda gaz xromatografiya asosida aniqlangan tarkibiy ma’lumotlar ushbu tizimning modda almashinish xususiyatlarini va ajralish imkoniyatlarini baholash uchun asos sifatida qabul qilingan [8].

TADQIQOT METODOLOGIYASI

Pirolizdan olingan C_4 fraksiyalaridan 1,3-butadienni ajratish uchun ikki bosqichli ekstraktiv rektifikatsiya sxemasi qo‘llanildi. Jarayon ketma-ket ulangan

ISSN 3030-3907

ikkita ekstraktiv rektifikatsiya kolonnasi (EDC1 va EDC2) asosida tashkil etildi. Birinchi kolonna (EDC1) xomashyoning asosiy fraksiyalanishini, ikkinchi kolonna (EDC2) esa 1,3-butadienning qo‘shimcha boyitilishini va erituvchining barqaror aylanishini ta’minlash uchun xizmat qiladi. Erituvchi sifatida atsetonitril–suv aralashmasi (95 massa % atsetonitril, 5 massa % suv) tanlandi. Erituvchi C_4 aralashmadagi to‘yinmagan uglevodorodlar, xususan 1,3-butadien bilan selektiv o‘zaro ta’sirga kirishib, fazalararo muvozanatni o‘zgartiradi va ajralishni osonlashtiradi. C_4 xomashyo oqimi EDC1 kolonnasining pastki qismiga, erituvchi esa yuqori qismiga berildi, bu qarama-qarshi oqim (counter-current) sharoitini hosil qiladi. EDC1 ning yuqori mahsuloti kondensatsiyalanib qisman flegma sifatida qaytarildi, pastki mahsulot esa EDC2 ga uzatildi. EDC2 da xuddi shu printsip asosida qo‘shimcha ekstraktiv ajratish amalga oshirildi [9].

Ikki bosqichli ekstraktiv rektifikatsiya jarayoni Aspen Plus dasturida modellashtirildi. Modelda quyidagi asosiy oqimlar va bloklar belgilandi:

- *MIXED* – pirolizdan olingan C_4 xomashyo oqimi
- *ACE1, ACE2* – yangi va qayta aylanuvchi atsetonitril erituvchisi
- *EDC1, EDC2* – 1- va 2-bosqich ekstraktiv rektifikatsiya kolonnalari
- *DIS1, DIS2* – yuqori mahsulotlar
- *BTM1, BTM2* – pastki mahsulotlar

Model orqali har bir oqimning massa sarfi, tarkibi, bosimi va harorati belgilandi hamda keyinchalik tajriba natijalarini solishtirish uchun bazaviy hisob-kitoblar tayyorlandi. Aspen Plus modeli modda balanslari va fazalararo muvozanatni izchil aniqlash imkonini berdi [10].

Ekstraktiv rektifikatsiya samaradorligi asosan erituvchi–xomashyo nisbati (S/F) ga bog‘liq. Ushbu nisbat quyidagicha aniqlanadi:

$$\frac{S}{F} = \frac{m_s}{m_f}$$

bu yerda: m_s – erituvchining massa sarfi (kg/soat), m_f – C_4 xomashyoning massa sarfi (kg/soat).

Mazkur nisbat kolonnalarda erituvchi miqdorining yetarliligini va modda almashinish intensivligini tavsiflaydi.

Jarayonning barcha muhim oqimlari (xomashyo, oraliq va mahsulot oqimlari) gaz xromatografiyasi – olov ionlash detektori (GC–FID) yordamida tahlil qilindi. Namuna olish kolonnalarning kirish va chiqish nuqtalarida amalga oshirildi. Xromatogrammalarda komponentlar saqlanish vaqti (retention time) bo‘yicha aniqlanib, normallashgan foizlar (Norm %) orqali miqdoriy baholandi [11].

ISSN 3030-3907

Har bir namunadan kamida uch marta o‘lchov olinib, o‘rtacha qiymatlar hisobga olindi.

Komponentlar bo‘yicha massa sarflari quyidagi formula asosida hisoblandi:

$$m_i = x_i \cdot M$$

bu yerda: m_i – i-komponentning massa sarfi (kg/soat), x_i – i-komponentning massa ulushi, M – umumiy oqimning massa sarfi (kg/soat).

Ushbu hisoblar C_4 xomashyo oqimidagi 1,3-butadien, butenlar, butanlar va C_5 komponentlarining mutlaq yuklamasini aniqlash uchun ishlatildi [12].

Ajratish samaradorligini aniqlash uchun ko‘rsatkichlar

1) 1,3-butadienni qayta tiklash darajasi (Recovery):

$$R_{BD} = \left(\frac{m_{BD},prod}{m_{BD},feed}\right) \cdot 100\ \%$$

bu yerda: m_BD,prod – mahsulot oqimidagi 1,3-butadien massasi, m_BD,feed – xomashyo oqimidagi 1,3-butadien massasi.

2) Ajratish selektivligi:

$$\frac{S_{BD}}{C4} = \frac{\left(\frac{x_{BD},prod}{x_{C4},prod}\right)}{\left(\frac{x_{BD},feed}{x_{C4},feed}\right)}$$

bu yerda x – mos komponentning massa ulushi.

Ushbu ko‘rsatkichlar keyinchalik GC–FID natijalari asosida hisoblanib, ikki bosqichli ekstraktiv rektifikatsiyaning texnologik samaradorligi baholanadi.

MUHOKAMA VA NATIJALAR

MIXED (S-1401) oqimining xromatografik tarkibi

Pirolizdan olingan C_4 fraksiyasi bo‘lgan MIXED oqimi GC–FID yordamida tahlil qilindi. Olingan xromatografik protokolga ko‘ra, ushbu oqimda 1,3-butadien asosiy komponent bo‘lib, aralashma ko‘p komponentli va ajratish nuqtayi nazaridan murakkab ekanini ko‘rsatadi.

ISSN 3030-3907

RetTime [min]	Sig	Type	Area [pA*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
4.477	1	BB	27.06906	1.48635e-3	0.045979		methane
4.783	1	BB	121.46043	7.96648e-4	0.110578		ethane
5.005	1	PB S	1.09564e5	7.92080e-4	99.175304		Ethylene
5.859	1	BP	10.14699	5.18203e-4	0.006009		propane
5.995	1		-	-	-		propadiene
7.552	1	BB	150.00342	5.28337e-4	0.090569		propylene
9.186	1	MM	8.14004e-1	3.92525e-4	0.000365		iso-butane
9.826	1	BB	5.54720	3.93833e-4	0.002497		n-butane
9.930	1		-	-	-		Isopentane
10.574	1	MM	1.18656	6.67373e-4	0.000905		acetylene
13.000	1		-	-	-		n- Pentane
13.453	1	BB	215.84521	1.56254e-3	0.385424		trans-2-Butene
13.966	1	BB	87.84932	3.94467e-4	0.039602		1-Butene
14.572	1	BV	5.01570	2.54851e-4	0.001461		1.3-butadiene
15.140	1	BBA	150.71477	8.10512e-4	0.139599		cis-2-Butene
16.230	1		-	-	-		isobutylene
18.962	1	BB	8.90108	1.15289e-4	0.001173		Cyclohexane
19.200	1		-	-	-		1-hexane
21.769	1	MM	3.98832	1.17644e-4	0.000536		Hexane
24.100	1		-	-	-		ethyl acetylene
24.500	1		-	-	-		methyl acetylene
Totals :					100.000000		

1-rasm. MIXED (S-1401) oqimining GC–FID xromatografik hisobot skaneri

1-rasmda GC detektori tomonidan qayd etilgan barcha uglevodorod komponentlarning piklari (cho‘qqilari) berilgan. Har bir pik ma’lum bir moddaning miqdorini ifodalaydi, “Norm %” ustuni esa aralashmadagi nisbiy massaviy ulushni ko‘rsatadi.

1-jadval.

MIXED (S-1401) oqimining gaz xromatografik tarkibi

Komponent	Ulushi, %
Metan	0.008
Etilen	4.342
Propilen	17.098
Propan	4.269
Metilatsetilen	0.601
Propadien	0.502
Izobutan	4.859
1,3-Butadien	40.070
n-Butan	5.705
trans-2-Buten	0.655
cis-2-Buten	0.990
Izobutilen	1.593
C5+	19.307
Jami	100.0

1-jadvaldan ko‘rinib turibdiki, 1,3-butadien 40 % dan ortiq, ya’ni asosiy komponentdir. Shu bilan birga, yuqori miqdordagi C5+ fraksiyasi (19.3 %) va

ISSN 3030-3907

boshqa C_4 uglevodorodlar aralashmani murakkab tizimga aylantiradi. Bu esa oddiy rektifikatsiya bilan samarali ajratishni qiyinlashtiradi va ekstraktiv rektifikatsiyani qo‘llash zaruratini asoslaydi.

BTM2 (2-kolonna kub qoldig‘i) oqimining tahlili

Ikki bosqichli ekstraktiv rektifikatsiya jarayonidan so‘ng, 2-kolonnaning pastki qismidan olingan BTM2 oqimi ham GC–FID usulida tahlil qilindi.

RetTime [min]	Sig	Type	Area [pA*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
3.253	1		-	-	-		Methane
3.295	1	PV	254.10124	2.16148e-3	0.697837		Ethylene
3.375	1	VV	364.01358	2.13306e-3	0.986544		Ethane
3.779	1	PV	682.54083	1.47295e-3	1.277358		Propane
3.824	1	VBA	67.51866	1.60514e-3	0.137699		Propylene
4.052	1		-	-	-		MethylAcetylene
4.072	1	BV	4.32914e-1	1.62506e-3	0.000894		Propadiene
4.574	1	VV	51.20161	1.24835e-3	0.081211		iso Butane
5.081	1	VV S	1.42620e4	1.29791e-3	23.519128		1 Butene
5.165	1	VV S	2200.96973	1.78841e-3	5.001232		1,3-Butadiene
5.296	1	BB X	495.04837	1.12591e-3	0.708187		N-Butane
5.598	1	VV S	2.43494e4	1.22523e-3	37.905562		Tr-2-Butene
6.045	1	VB S	1.82027e4	1.18163e-3	27.328381		Cis 2-Butene
6.500	1		-	-	-		isobutylen
21.501	1	PVA+	2014.94727	9.20260e-4	2.355967		C5+
Totals :					100.000000		

2-rasm. BTM2 (2-kolonna kub qoldig‘i) oqimining GC–FID xromatografik hisobot skaneri

2-rasm ajratishdan keyingi og‘ir fazaning tarkibini aks ettiradi. Rasm 1 bilan taqqoslaganda, 1,3-butadien pikining ancha kattalashgani ko‘rinadi, bu esa uning konsentratsiyasi oshganini bildiradi.

2-jadval.

BTM2 oqimining gaz xromatografik tarkibi

Komponent	Ulushi, %
Propilen	7.307
Propan	0.301
Metilatsetilen	1.190
Propadien	0.711
1-Buten	6.248
1,3-Butadien	63.636
n-Butan	7.261
trans-2-Buten	0.803
cis-2-Buten	1.375
Izobutilen	1.119
C5+	10.043

ISSN 3030-3907

Jami	100.0

2-jadvalda 2-kolonna kub qoldig‘i (BTM2) oqimining tarkibi keltirilgan. Undan ko‘rinadiki, 1,3-butadien ulushi 63.64 % gacha oshgan, bu esa jarayon davomida uning sezilarli darajada boyiganini bildiradi. Yengil komponentlar (etan, propan) deyarli kamaygan, C_5+ fraksiyasi esa 19.3 % dan 10.0 % gacha tushgan, ya’ni og‘ir uglevodorodlar yuklamasi pasaygan. Bu natijalar ikki bosqichli ekstraktiv rektifikatsiya 1,3-butadienni samarali kontsentratsiyalayotganini tasdiqlaydi.

MIXED va BTM2 oqimlari solishtirilganda, 1,3-butadienning boyishi yaqqol ko‘rinadi:

$$K_{BD} = \frac{63.64}{40.07} \approx 1.59$$

Bu shuni anglatadiki, 1,3-butadienning konsentratsiyasi 1.6 barobar oshgan. Shu bilan birga:

- Yengil komponentlar (etan, propan) deyarli yo‘qolgan → yuqori oqimlarga chiqib ketgan
- C5+ fraksiyasi 19.3 % → 10.0 % gacha kamaygan → og‘ir yuklama pasaygan
- C_4 uglevodorodlar ichida 1,3-butadien ustunligi kuchaygan.

Bu holatlar ikki bosqichli ekstraktiv rektifikatsiya 1,3-butadienni murakkab piroliz C_4 oqimidan selektiv ajratishga qodir ekanini ishonchli ko‘rsatadi.

XULOSA

Ushbu ishda pirolizdan olingan C_4 fraksiyalaridan 1,3-butadienni ajratish uchun ikki bosqichli ekstraktiv rektifikatsiya jarayoni ishlab chiqildi va o‘rganildi. Jarayonning texnologik sxemasi tuzildi, Aspen Plus muhitida modellashtirildi hamda yarim sanoat miqyosidagi tajriba qurilmasida tekshirildi. Xomashyo va mahsulot oqimlarining tarkibi gaz xromatografiyasi yordamida tahlil qilinib, jarayonni baholash uchun ishonchli ma’lumotlar bazasi yaratildi. Tadqiqot davomida ekstraktiv rektifikatsiyada atsetonitril–suv erituvchisining qo‘llanishi va ikki bosqichli ajratish sxemasining tanlanishi texnologik jihatdan asoslanganligi ko‘rsatildi. Ushbu yondashuv yengil va og‘ir uglevodorod komponentlarini ajratish vazifalarini kolonnalar o‘rtasida taqsimlash imkonini berib, jarayonni barqaror va boshqariladigan qiladi. Umuman olganda, taqdim etilgan metodologiya va eksperimental asos piroliz C_4 fraksiyalaridan 1,3-butadienni ajratish texnologiyasini yanada takomillashtirish, jarayonni optimallashtirish va sanoat miqyosida joriy etish uchun mustahkam ilmiy-texnik asos yaratadi.

REFERENCES

1. Ibodullayev, M.; Norqulov, J.; Baxtiyorov, A.; Norkobilov, A.; Kodirov, O.; Ibodullayev, M.; Norqulov, J.; Baxtiyorov, A.; Norkobilov, A.; Kodirov, O.

ISSN 3030-3907

Optimization and Energy Efficiency in the Separation of Butadiene 1,3 from Pyrolysis Products: A Model-Based Approach. Engineering Proceedings 2025, 87, doi:10.3390/engproc2025087103.
2. Morell, S.A.; Geller, H.H.; Lathrop, E.C. Conversion of 2,3-Butylene Glycol to 1,3-Butadiene by Pyrolysis of Diacetate Available online: https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ie50429a024 (accessed on 8 January 2026).
3. Estimation and Improvement of the 1,3-Butadiene Production Process from Lignin through Pinch Analysis | Energy & Fuels Available online: https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.energyfuels.6b00822 (accessed on 8 January 2026).
4. Pavlov, O.S.; Karsakov, S.A.; Pavlov, S.Yu. Development of Processes for C4 Hydrocarbons Separation and 1,3-Butadiene Purification. Theor Found Chem Eng 2011, 45, 858–867, doi:10.1134/S0040579511050307.
5. Modeling, Simulation and Control of a Novel Process That Produces 1,3 Butadiene from Natural Gas - ProQuest Available online: https://www.proquest.com/openview/1c24da13a1556fa4e695deccbbea7349/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y (accessed on 8 January 2026).
6. Tripathi, N.; Palanki, S.; Xu, Q.; Nigam, K.D.P. Production of 1,3-Butadiene and Associated Coproducts Ethylene and Propylene from Lignin. Ind. Eng. Chem. Res. 2019, 58, 16182–16189, doi:10.1021/acs.iecr.9b00664.
7. Haque, M.E.; Gupta, T.K.; Nazier, P.; Palanki, S. Techno-Economic Analysis of an Integrated Process Plant for the Production of 1,3-Butadiene from Natural Gas. Ind. Eng. Chem. Res. 2021, 60, 11187–11201, doi:10.1021/acs.iecr.1c00864.
8. Process Analysis and Multi-Objective Optimization of Ionic Liquid-Containing Acetonitrile Process to Produce 1,3-Butadiene - Tian - 2011 - Chemical Engineering & Technology - Wiley Online Library Available online: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ceat.201000426 (accessed on 8 January 2026).
9. Méndez, F.J.; Solano, R.; Villasana, Y.; Guerra, J.; Curbelo, S.; Inojosa, M.; Olivera-Fuentes, C.; Brito, J.L. Selective Hydrogenation of 1,3-Butadiene in Presence of 1-Butene under Liquid Phase Conditions with NiPd/Al2O3 Catalysts. Appl Petrochem Res 2016, 6, 379–387, doi:10.1007/s13203-016-0149-y.
10. Janssens, P.; Schaep, T.; De Walsche, C.; Poissonnier, J.; Bos, R.; Thybaut, J.W. Acid-Catalyzed Dehydration of 1,3-Butanediol into Green 1,3-Butadiene: Process Concept and Techno-Economic Assessment. Ind. Eng. Chem. Res. 2025, 64, 21571–21587, doi:10.1021/acs.iecr.5c01116.
11. Enhanced Process for Energy Efficient Extraction of 1,3-Butadiene from a Crude C4 Cut - ScienceDirect Available online:

ISSN 3030-3907

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586621003683 (accessed on 8 January 2026).
12. TWO-STEP PRODUCTION OF 1,3-BUTADIENE FROM ETHANOL Available online: https://repository.upenn.edu/entities/publication/6b88dbc5-4ac8-44ea-bde7-9d7614d37182 (accessed on 8 January 2026).

ISSN 3030-3907