

인도네시아 칼리만탄 남동부 바리토 분지의 석유 탐사 잠재성 고찰: 인접한 쿠타이 분지와 석유시스템 비교

원석기¹, 신영재^{2*}, 헤루 라스티아디 세티완³, 조나단 셋요코 하딤울조노³, 손미라²

¹한국가스공사 해외사업본부, ²한국지질자원연구원 CO₂지중저장연구단, ³인도네시아 레미가스

A study on petroleum exploration potential of Barito Basin in southeastern Kalimantan, Indonesia: comparison of petroleum system with adjacent Kutai Basin

SeokGi Won¹, Young Jae Shinn^{2*}, Herru Lastiadi Setiawan³, Jonathan Setyoko Hadimuljono³, Mira Son²

¹Overseas Business Division, Korea Gas Corporation (KOGAS)

²Center for CO₂ Geological Storage, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

³Research and Development Centre for Oil and Gas Technology (LEMIGAS), Agency of Research and Development for Energy and Mineral Resources, Indonesia

요 약

인도네시아 칼리만탄 남동부에 위치한 신생대 열개 분지인 바리토 분지와 쿠타이 분지는 석유탐사 역사가 오래된 분지이다. 지리적으로 인접한 두 분지는 분지형성 기작과 퇴적환경 발달이 매우 유사하지만 쿠타이 분지에서는 다수의 대규모 유전이 발견된 반면, 바리토 분지에서는 분지 북동부 지역에 국한되어 유전이 발견되었다. 두 분지의 퇴적환경은 대체로 동시열개 호소성 환경에서 삼각주 퇴적상, 후열개 해양성 환경으로 변화하는 유사한 특징을 나타낸다. 하지만, 바리토 분지는 동시열개 단정층, 쿠타이 분지는 후열개 삼각주 퇴적층이 주요한 석유시스템을 형성하고 있으며, 각각 동시열개 단계의 석유시스템 유형과 후열개 단계의 석유시스템 유형과 대비된다. 이와 같이 석유시스템 발달 유형이 다른 이유는 조구조적 운동과 관련된 용기와 분지 침강이 시기적으로 다르게 일어나 근원암 매몰 심도와 성숙도에 영향을 미쳤기 때문이다. 메라투스 산맥의 차별적인 용기는 바리토 분지의 북동부 지역을 중심으로 동시열개 퇴적층인 단정층의 열적 성숙이 가능하게 하였다. 반면에 칼리만탄 중앙 산맥의 용기는 쿠타이 분지의 동시열개 퇴적층의 식박을 야기하였고, 식박된 퇴적물들은 후열개 단계 동안 두꺼운 삼각주 퇴적층을 형성하면서 충분히 매몰되어 후열개 단계 석유시스템 유형이 발달하게 되었다. 바리토 분지의 탐사 잠재성은 이미 알려진 동시열개 단정층에 여전히 남아 있고, 그 외에 신생대 이전 균열 기반암, 후열개 와루킨층 저류암, 바리토 분지 서쪽 지역 베라이 탄산염 저류암에 대한 추가적인 탐사와 평가가 필요하다.

핵심어: 바리토 분지, 쿠타이 분지, 석유 시스템, 석유 탐사, 칼리만탄

ABSTRACT

The Kutai and Barito basins are the Cenozoic rift basins in southeastern Kalimantan, Indonesia and are very mature for hydrocarbon exploration history. Both basins have experienced similar structural evolution and depositional history. Despite the similarity between two basins, large oil and gas fields were found in the Kutai Basin, whereas not common in the Barito Basin and localized in its northeastern part. Depositional history of both basins evolved from lacustrine syn-rift to marine post-rift stages through fluvio-deltaic transitional environment. However, different type of petroleum system has been identified in the Barito and Kutai basins. Syn-rift lacustrine to fluvio-deltaic sequence (Tanjung Formation) is an essential element of petroleum system in the Barito Basin and post-rift deltaic sequence (Balikpapan and Kampung Baru formations) is a key element in the Kutai Basin. Such difference in the petroleum system type is associated with difference in burial history, affected by spatio-temporal variation of uplifting and basin subsidence. The differential uplifting of the Meratus Mountains allowed the syn-rift Tanjung Formation to reach thermal maturation only in the northeastern Barito Basin. The uplifting of the Central Kalimantan Mountains, however, caused erosion of the syn-rift sequence in the Kutai Basin and supplied enough sediments to form the post-rift deltaic sequence with thermal maturity. Future exploration potential of the Barito Basin still remains in the well-known, syn-rift Tanjung Formation and needs to be further evaluated from the pre-Cenozoic fractured basement, the post-rift Warukin, and the Beraí limestone reservoirs particularly in the western region of the Barito Basin.

Keywords: Barito Basin, Kutai Basin, petroleum system, hydrocarbon exploration, Kalimantan

1. 서론

바리토 분지(Barito Basin)와 쿠타이 분지(Kutai Basin)는 인도네시아 칼리만탄(Kalimantan) 섬의 남동쪽에 위치하며(Fig. 1), 인도네시아에서 석유탐사 역사가 오래된 분지들이다. 미국지질조사소

(USGS)의 2010년 동아시아 지역 미발견 석유가스 매장량 평가 보고서에 의하면, 바리토 분지와 쿠타이 분지는 미발견 매장량(95% probability 기준)이 각각 131 MMboe, 5,495 MMboe로 추정되었다(Schenk *et al.*, 2010). 이 분지들은 신생대에 형성된 열개 분지이며, 후기 올리고세에 형성된 북서-남동 방향의 아당단층(Adang

Manuscript received June 21, 2018; Revised June 28, 2018; Accepted June 29, 2018.

*Corresponding author: Young Jae Shinn, Tel: +82-42-868-3251, Fax: +82-42-868-3414, E-mail: shinn21@kigam.re.kr

© 2018 Korean Society of Petroleum and Sedimentary Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Fault)에 의해 구조적으로 분리된다(Fig. 1)(Sikumbang, 1990; Moss and Chambers, 1999). 바리토 분지와 쿠타이 분지는 시기별 퇴적 환경의 발달에 있어 유사점을 가진다. 즉, 에오세-올리고세 동시열개 시기의 호소성 환경과 해침(transgression)에 따른 삼각주 퇴적환경, 올리고세-마이오세 후열개 시기의 해양 환경과 해퇴(regression)에 따른 삼각주 환경이 두 분지에서 잘 발달한다(Kusuma and Darin, 1989). 따라서 바리토 분지와 쿠타이 분지는 유사한 조 구조적 운동의 영향을 받았으며, 또한 유사한 석유시스템이 발달했을 것으로 기대된다. 하지만 쿠타이 분지는 마하캄 삼각주(Mahakam Delta) 지역에서 대규모 유전들이 다수 확인된 반면, 바리토 분지에서는 양질의 근원암, 저류암, 덮개암을 확인하였지만, 발견된 유전의 수가 적고, 주로 습곡과 스트리트 단층들이 집중되어 있는 분지의 북동부 지역에서만 발견되었다.

다수의 유·가스전이 분포하는 인도네시아 칼리만탄 지역에 대한 국내 및 해외 자원개발 기업의 관심이 매우 높다. 게다가 최근에는 이 지역에서 석탄층가스 개발을 시작하였고, 셰일가스 자원 개발 가능성에 대한 연구도 활발히 진행 중이다(Sapiie *et al.*, 2014; Larasati *et al.*, 2015; Sumotarto *et al.*, 2016). 쿠타이 분지는 칼리만탄 지역에서 석유자원 개발이 성숙한 단계에 이른 분지이지만, 최근까지도 다수의 탐사 성공이 알려져 있다. 반면에 이와 인접한 바리토 분지는 북동쪽에 위치한 탄정(Tanjung) 지역 유전들을 제외하고는 유·가스 징후 확인만 있을 뿐이다. 이러한 차이를 이해하기 위해서

는 두 분지의 퇴적 및 구조 발달사와 석유시스템 형성 과정에 있어서 유사성과 차별성을 살펴보는 것이 필요하다. 본 연구는 바리토 분지와 쿠타이 분지에서 확인되었거나, 유망한 석유시스템의 차이점을 검토하고, 향후 바리토 분지에서의 탐사 잠재성을 제시하고자 한다.

2. 광역 지질

바리토 분지와 쿠타이 분지는 신생대 퇴적분지로 칼리만탄 남동쪽에 위치하고 있으며 지리적으로 아당 단층대(Adang Fault Zone)를 경계로 서로 마주보고 있다(Fig. 1). 바리토 분지는 70,000 km²의 면적을 차지하며, 남쪽으로 자바해(Java Sea)를 향해서 좁게 열려 있고, 동쪽으로는 메라투스 산맥(Meratus Mountains)과 접하고 있다. 분지는 메라투스 산맥을 따라 전면부 침강지역(foredeep)이 좁고 길게 발달하고, 서쪽의 스크와나 산맥(Schwaner Mountains) 지역으로 갈수록 경사가 완만해져 비대칭형을 이룬다(Fig. 2a)(Satyana *et al.*, 1999). 메라투스 산맥은 오프올라이트(ophiolite)와 열도형 암석(arc-type rocks)으로 구성된 융기대이며, 스크와나 산맥은 심성암, 화산암 및 변성암으로 구성된 복합체(complex)이다. 쿠타이 분지는 인도네시아에서 가장 넓은 165,000 km²의 면적을 차지하며, 가장 두꺼운 퇴적층으로 채워져 있다. 분지 남쪽으로는 융기된 지역인 아당 단층대가 발달하고 동쪽으로는 점점 깊어지면서 마카사르 해협(Makassar Strait)으로 이어진다(Fig. 1). 북쪽으로는 올리고세의 기반암 융기대가 발달하여 타라칸 분지(Tarakan Basin)와 경계를 이루며, 서쪽으로는 칼리만탄 중앙 산맥(Central Kalimantan Mountains)이 발달한다(Satyana *et al.*, 1999). 쿠타이 분지는 서쪽의 상부 쿠타이(Upper Kutai) 분지와 동쪽의 하부 쿠타이(Lower Kutai) 분지로 나뉜다. 상부 쿠타이 분지는 후기 마이오세 구조적 융기로 침식작용을 받았고, 하부 쿠타이 분지는 오직 신생대(Neogene)동안 퇴적이 있었던 지역으로 알려져 있으며, 대부분 상부 쿠타이 분지의 고신생대(Paleogene) 퇴적물을 덮고 있다(Fig. 2b)(Wain and Berod, 1989; Moss and Chambers, 1999).

바리토 분지는 주로 신생대 퇴적물로 채워져 있으며, 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 퇴적층의 두께가 두꺼워진다(Fig. 2a). 북북동-남남서 방향으로 습곡과 충상단층(thrusts) 구조들이 분지의 북동 지역에 주로 잘 발달한다. 이러한 구조의 발달 방향은 순다대지(Sundaland)와 메라투스 산맥 사이 백악기 섭입대로 알려진 봉합대의 방향과 평행하게 발달한다. 분지의 동쪽 경계를 이루는 이 구조는 충상단층들과 이를 연결하는 이음단층들(transverse faults)로 구성되어 있고, 특히 북쪽의 탄정과 카사레(Kesale) 지역에서 폭이 좁은 비대칭 습곡들이 en-echelon 형태로 잘 발달한다(Fig. 3). 이들 단층과 습곡들은 대개 북북동-남남서 방향으로 촘촘하게 발달한다. 북서-남동 방향의 단층들도 지표에 노출되어 있고, 이들은 북북동 방향의 변형구조보다 오래된 것들이다. 습곡과 충상단층들은 마이오세 메라투스 산맥의 융기와 관련된 힘에 의해서 형성되었으며, 북서-남동 방향의 단층은 분지 열개(rifting) 구조운동과 관련된 것으로 해석되었다

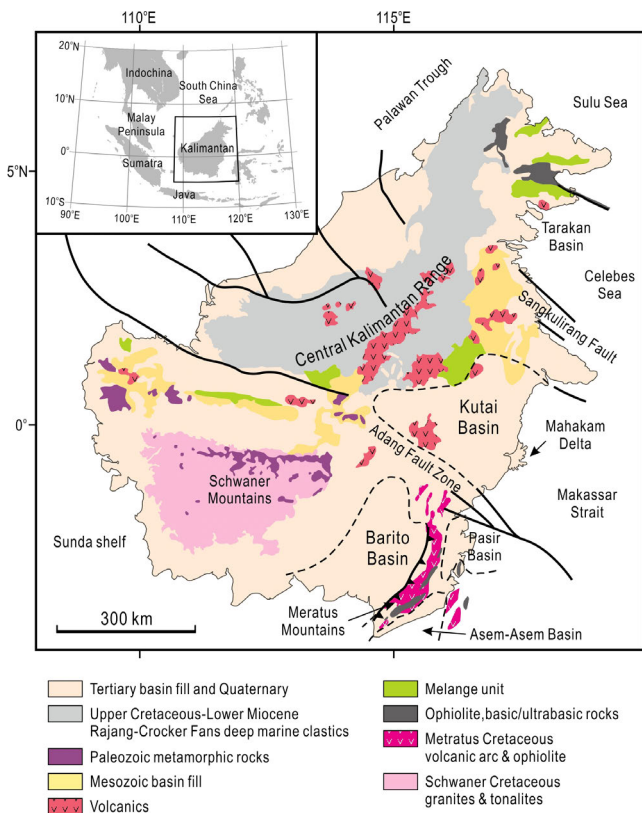


Fig. 1. Simplified geological map of Kalimantan (after Hall *et al.*, 2008).

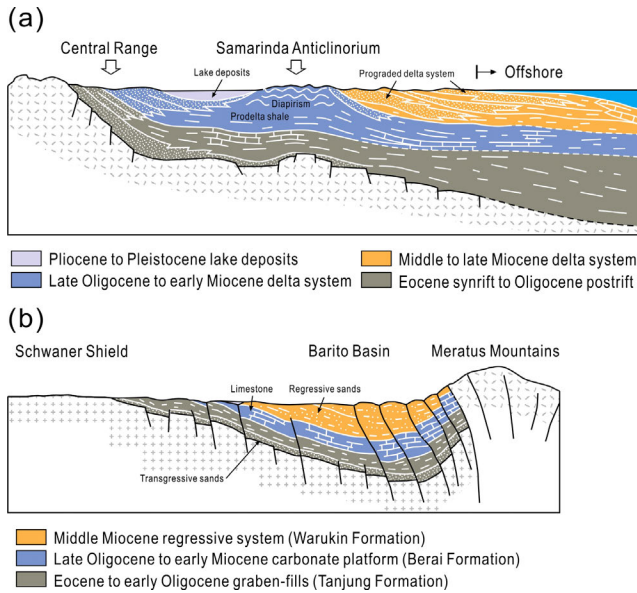


Fig. 2. Geological cross-sections across (a) Barito and (b) Kutai basins (after Satyana *et al.*, 1999).

(Kusuma and Darin, 1989; Rotinsulu *et al.*, 1993).

쿠타이 분지 또한 주로 신생기 퇴적층으로 채워져 있으며, 광역적인 구조들은 분지의 열개와 압축에 의해 형성되었다(Hutchinson, 1996; Moss *et al.*, 1997; Moss and Chambers, 1999). 후기 올리고세에 북부 칼리만탄 지역에서 일어난 고남중국해(Proto-South China Sea) 해양지각의 섭입으로 주변지역에 쿠칭 융기대가 발달하고, 이 융기대로부터 퇴적물이 유입되어 마하캄 삼각주가 동쪽으로 전진구축하며 발달하였다. 이후 마이오세 중기와 후기에 나타난 북서-남동 방향의 압축력으로 북-북동 방향의 배사구조가 발달하고, 마하캄 삼각주의 지속적인 퇴적으로 성장단층들이 퇴적물 유입 방향과 수직으로 발달한다.

3. 석유개발 역사

바리토 분지와 쿠타이 분지는 인도네시아에서 석유탐사 역사가 오래된 분지에 속한다. 바리토 분지는 1845년에 Royal Dutch Shell 사에 의해 첫 번째 지질학적인 조사가 수행되었으며, 체계적인 탐사는 19세기 후반에 이루어졌다. 바리토 분지에서 첫 상업적인 원유는 1938년 Royal Dutch Shell의 전신인 BPM에 의해 탄정 유전(Tanjung Field)에서 생산되었다. 현재까지 탄정 유전의 누적 생산량은 143.15 MMSTB 정도로 알려져 있다(Aslam *et al.*, 2017). 이후 1960년대 와루킨 셀라탄(Warukin Selatan), 타피안 티무르(Tapian Timur) 유전이 발견되었고 1980년대 후반부터 현재까지 일부 소규모의 추가 발견이 있었지만, 그 외 나머지 대부분의 탐사 결과는 건공 또는 유·가스 징후만 확인되었으며, 상업적인 발견으로 이어지지 못했다(Fig. 3).

쿠타이 분지에서는 발리파판-사마린다(Balikpapan-Samarinda)

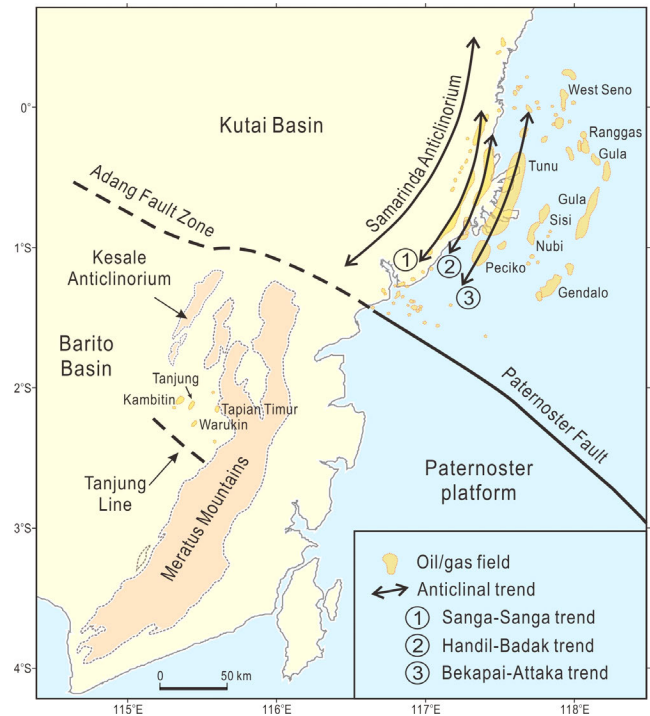


Fig. 3. Location of oil and gas fields in Barito and Kutai basins (Doust and Noble, 2008). Note NNE-trending anticlines forming oil and gas fields in Mahakam Delta region. Tanjung Line was proposed to demarcates a boundary between deformed and undeformed areas in Barito Basin (Bon *et al.*, 1996).

지역에서 1865년 Greve에 의해 다수의 유정이 보고되었고, 1891년에 네덜란드 민간 석유회사가 석유탐사 허가권을 받아 본격적으로 개발되어 1897년부터 석유가 생산되었다. 1897년부터 1905년까지 상가상가(Sanga-Sanga) 유전 외 3개의 추가 유전(Mathilda, Klандasan, Sambutan)을 발견, 1930년대 상가타(Sangatta) 유전, 1970년대 아타카(Attaka), 바닥(Badak), 한딜(Handil) 등 다수의 큰 유전이 확인되었다(Fig. 3). 그 이후로도 지속적인 탐사로 상업성 있는 유·가스전 발견이 현재까지 지속되고 있다.

지금까지 바리토 분지에서는 대규모 유전이 거의 발견되지 않았으나, 쿠타이 분지에서는 다수의 대규모 유전이 발견되었다. 두 분지 모두 대부분의 유전이 신생기(Neogene)와 플라이스토세 동안에 변형을 받으며 만들어진 지역에서 확인되었다. 바리토 분지의 유전은 탄정 지역에 단층작용을 받은 배사 구조에서, 쿠타이 분지의 유전은 사마린다 북배사(Samarinda Anticlinorium)-마하캄 삼각주 지역에 대부분 분포한다(Fig. 3).

4. 분지 구조 및 진화

4.1. 조구조

칼리만탄은 유라시아판에 속하는 순다대지의 남동쪽 경계부에 위치한다. 바리토 분지와 쿠타이 분지가 위치하고 있는 칼리만탄의 남

동부는 중생대-신생대 동안 유라시아판, 필리핀판, 오스트리아판이 서로 경계를 이루는 지역으로 조구조 발달 과정이 매우 복잡하였다.

후기 백악기에 동남아시아에서는 테티스해(Tethys Sea) 해양지각이 순다대지 아래로 섭입하면서 칼리만탄 동부 지역에 오피올라이트, 화산쇄설물, 화산열도가 생성되었다(Fig. 4). 이후 지속적인 섭입 작용으로 후기 백악기(Cenomanian-Turonian) 시기에 순다대지 연변부와 칼리만탄 열도 사이에 대륙-열도간 충돌이 일어나게 된다. 이러한 섭입 작용으로 순다대지에 현재의 자바해(Java Sea), 동자바해(East Java Sea), 칼리만탄 동부, 술라웨시(Sulawesi) 서부 지역이 부가(accretion) 되었다(van de Weerd and Armin, 1992; Metcalfe, 1996; Satyana, 1996; Wilson and Moss, 1999).

약 50 Ma에 순다대지 남동부에서 필리핀-태평양판과 오스트리아판의 섭입으로 북동-남서 방향의 세레베스해(Celebes Sea)가 열리기 시작하고, 칼리만탄 동부와 술라웨시 서부지역을 경계 짓는 마카사르 해협이 대륙지각 신장에 의해 형성되었다(van de Weerd and Armin, 1992; Hall, 1996; Moss *et al.*, 1997; Hall *et al.*, 2008). 이러한 후열도 작용으로 칼리만탄 동부에 북동-남서 방향의 그레이트 동칼리만탄 분지(Great East Kalimantan Basin)가 발달하였다(Matthews and Bransden, 1995; Smyth *et al.*, 2008). 이후 후기 올리고세에서 전기 마이오세 동안 남중국해의 해저면 확장에 따라 남쪽으로 이동하던 리드뱅크(Reed Bank), 팔라완(Palawan) 등과 같은 대륙지각의 일부분이 칼리만탄 북부지역과 충돌하면서 칼리만탄 중앙 산맥의 융기, 스크와나 산맥의 융기를 일으켰으며 해퇴가 진행되었다(Daly *et al.*, 1991; Hutchison, 1996; Moss and Chambers, 1999). 그리고 기존에 발달하였던 북서-남동 방향의 단층대를 따라 형성된 구조선(Adang Fault Zone, Sangkulirang Fault Zone)에 의해 그레이트 동칼리만탄 분지가 현재의 바리토, 쿠타이, 타라칸 분지로 나누어졌으며(Moss and Chambers, 1999), 퇴적물의 공급은 칼리만탄 중앙 산맥 지역 융기대로부터 이루어졌다(van de Weerd and Armin, 1992; Cham-

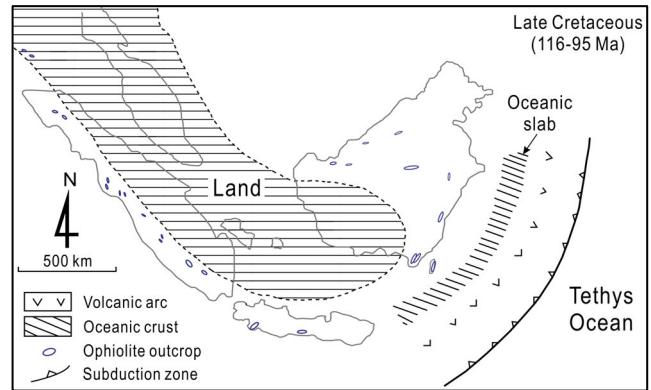


Fig. 4. Paleogeographic and tectonic evolution of SE Kalimantan and surrounding areas during Cretaceous (116-95 Ma) (modified from Sikumbang, 1990).

bers and Daley 1997; Ferguson and McClay, 1997; Moss *et al.*, 1998).

4.2. 분지 구조 발달

바리토 분지의 발달은 인도-오스트레일리아판과 유라시아판 사이의 섭입대에서 시작되었다. 팔레오세-에오세(약 60~40 Ma) 동안 인도-오스트레일리아판의 이동 방향이 변하면서 사교섭입이 일어났고, 이로 인해 좌수향 주향 이동성 전단대가 순다대지의 남동부에 발달하였다. 그 결과, 바리토 분지 지역에 북동-남서 방향의 횡인장 응력이 작용하였고 북서-남동 방향의 열개작용으로 퇴적가능 공간이 형성되었다(Daly *et al.*, 1991; Rotinsulu *et al.*, 1993; Satyana *et al.*, 1999). 그 결과, 지루(horst)와 지구대(graben) 구조가 일련의 방향성을 가지면서 형성되었다(Fig. 5a)(Satyana *et al.*, 1999).

중기 올리고세에 있었던 오스트리아판의 대륙지각과 필리핀판의 충돌로 두 대륙간 섭입대에서 좌수향 주향 이동성 움직임이 있었다. 오스트리아판에서 떨어져 나간 일부 대륙지각(Buton, Banggai-sula,

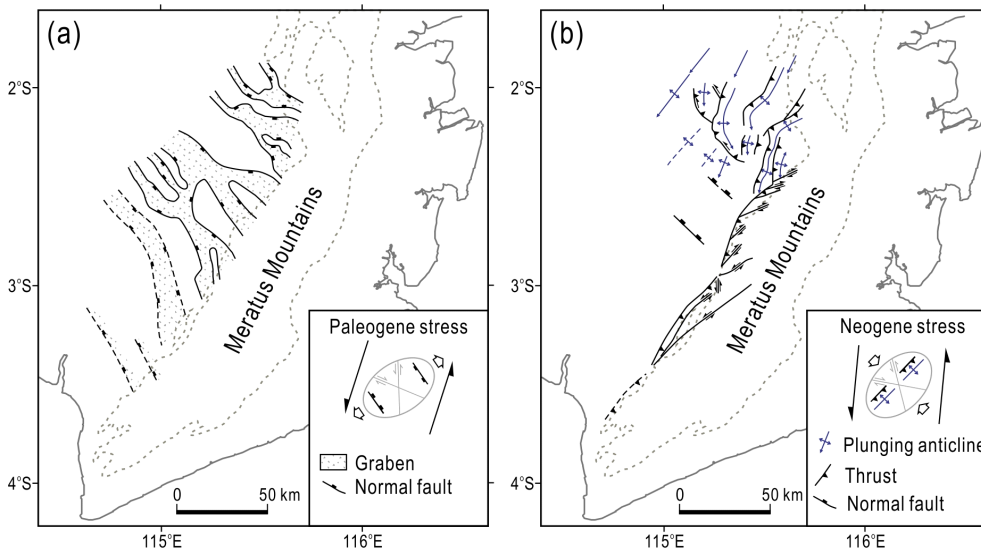


Fig. 5. Paleogene and Neogene structural elements of the eastern part of Barito Basin (after Kusuma and Darin, 1989).

Tukan blocks)이 필리핀판의 이동과 함께 인도네시아 쪽으로 이동되면서 각각 전기 마이오세, 중기 마이오세, 플라이오세 시기에 술라웨시(Sulawesi)와 충돌하게 된다(Garrard *et al.*, 1988; Davidson, 1991). 이 영향으로 바리토 지역에 압축력이 발달하여 메라투스 산맥이 융기하면서 분지에 구조역전이 일어났다. 구조역전의 결과로 북동-남서 방향의 습곡과 층상단층 구조가 잘 발달하였다(Fig. 5b). 이러한 역전 구조들은 분지의 북동부에 집중되어 있고, 서쪽과 남쪽 지역에는 거의 나타나지 않는다(Satyana, 1994). 압축력과 구조들은 현재까지도 칼리만탄 동부 지역에 영향을 미치고 있다.

쿠타이 분지는 에오세에 대륙 신장의 영향으로 북동-남서 방향의 반지구대가 발달하고, 후기 올리고세에서 전기 마이오세에 남중국해의 해저 확장에 의해 남쪽으로 이동해온 지각의 일부가 북부 칼리만탄에 충돌하면서 상부 쿠타이 분지가 융기하게 된다. 상부 쿠타이 분지를 융기시킨 압축력이 서쪽에서 동쪽으로 전파되고, 마이오세 시기 메라투스 산맥의 융기를 일으킨 압축력이 북서-남동 방향으로 작용하여 동부 칼리만탄 지역에 북동-남서 방향의 습곡, 층상단층 및 사마린다 북배사 구조가 발달한다. 융기된 지역으로부터 퇴적물이 공급되어 마하캄 삼각주가 동쪽으로 전진 구축하는 퇴적 양상을 보이며, 마하캄 삼각주 지역에 구조역전 삼각주 시스템이 발달하였다(Moss and Chambers, 1999; McClay *et al.*, 2000).

5. 층서 및 퇴적환경

5.1. 바리토 분지 층서

바리토 분지는 신생대 퇴적층으로 충진되어 있고, 다양한 기반암을 부정합으로 덮고 있다. 기반암은 심하게 변성을 받은 오피올라이트, 변성암 복합체, 쇄설성암, 탄산염암으로 구성되어 있거나 비변성 화산암체로 구성된다. 이들 기반암들은 대개 메라투스 산맥에 노출되어 있고, 주라기에서 팔레오세의 지질 연대를 보여준다(Sikumbang, 1990).

바리토 분지를 충진하고 있는 신생대 퇴적층은 하부에서부터 차례대로 탄정층(Tanjung Formation), 베라이층(Berai Formation), 와루킨층(Warukin Formation), 다호층(Dahor Formation)으로 구분된다(Fig. 6a). 최하부의 탄정층은 기반암이 확장되면서 형성된 지구대를 충진하는 퇴적층이다. 탄정층의 두께는 최대 약 2,500 m에 이르며, 분지 북쪽 지역에서 두껍고, 서쪽과 남쪽으로 가면서 상대적으로 얇아진다. 탄정층은 암상의 차이로 하부와 상부 탄정층으로 구분된다(Fig. 6a). 하부 탄정층은 충적선상지(alluvial fan)에서 퇴적된 역암, 사암, 셰일, 석탄이 우세하고, 상부로 가면서 천해성 퇴적물이 우세해진다. 상부 탄정층은 해침이 진행되면서 주로 천해에서 퇴적된 셰일과 이회암(marl)이 우세하다(Kusuma and Darin, 1989).

탄정층은 분지 구조 발달에 따라 하부에서부터 차례대로 퇴적단계-1, -2, -3, -4의 퇴적층으로 구분된다(Fig. 6a)(Satyana and Silitonga, 1994). 퇴적단계-1(Stage-1) 퇴적층은 지구대를 형성하

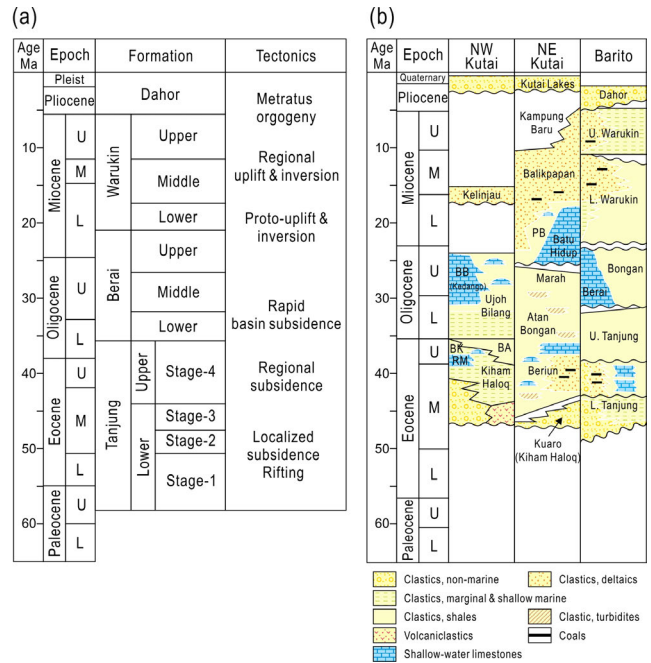


Fig. 6. (a) Stratigraphy and tectonic events of Barito Basin (after Satyana and Silitonga, 1994). (b) Stratigraphic correlation between Kutai and Barito basins (modified from Moss and Chambers, 1999; Wilson and Moss, 1999). BK = Batu Kelau Formation; BA = Batu Ayan Formation; BB = Batu Baleh Limestone Member; PB = Pulau Barang Formation; RM = Ritan Limestone Member; U = upper; M = middle; L = lower.

는 단층 활동에 의해 규제되어 지엽적으로 분포한다. 분지 열개와 더불어 충적선상지에서 퇴적된 적색층(red bed)과 분급이 불량하고, 층리가 거의 발달하지 않는 기저 역암층이 퇴적되기 시작하였고(Fig. 7a), 점진적으로 하천 또는 범람이 우세한(stream- or flood-flow dominated) 충적선상지 퇴적층, 호소성(lacustrine) 삼각주 사암, 전삼각주(prodelta) 이암층이 퇴적되었다. 충적선상지에서 퇴적된 조립질 퇴적암이 두껍게 분포하며, 분지 북동쪽의 탄정 유전에서 주요 저류암을 형성한다. 퇴적단계-2(Stage-2) 퇴적층은 주로 하성-삼각주(fluvio-deltaic) 퇴적층으로 구성된다. 퇴적단계-1과 -2의 경계는 소규모 융기와 침식 단절(erosional hiatus)을 나타내는 부정합면으로 여겨진다(Satyana and Silitonga, 1994). 이는 열개와 관련된 화산 활동의 마지막 단계인 도밍(doming)과 관련되었을 것이다. 융기로 인한 기저면(base level) 변화로 하도 충진 사암과 삼각주 사암 퇴적층이 잘 발달하였다(Fig. 7b). 이들 사암층은 조립질의 분급이 양호한 사암으로 괴상으로 발달하고, 횡적 연속성이 양호하여 바리토 분지의 주요한 탐사 목표가 된다. 이러한 하성-삼각주 사암 퇴적층들은 상부로 가면서 렌즈형의 틈상 퇴적체(crevasse splay), 유기물이 풍부한 셰일 및 석탄층으로 변화한다.

퇴적단계-3(Stage-3) 퇴적층은 해양 미화석과 해록석(glauconite)을 포함하는 셰일층이 나타나며, 이는 광역적인 분지 침강에 따른 분지내 첫 번째 해침을 지시한다. 중기-후기 에오세 동안 있었

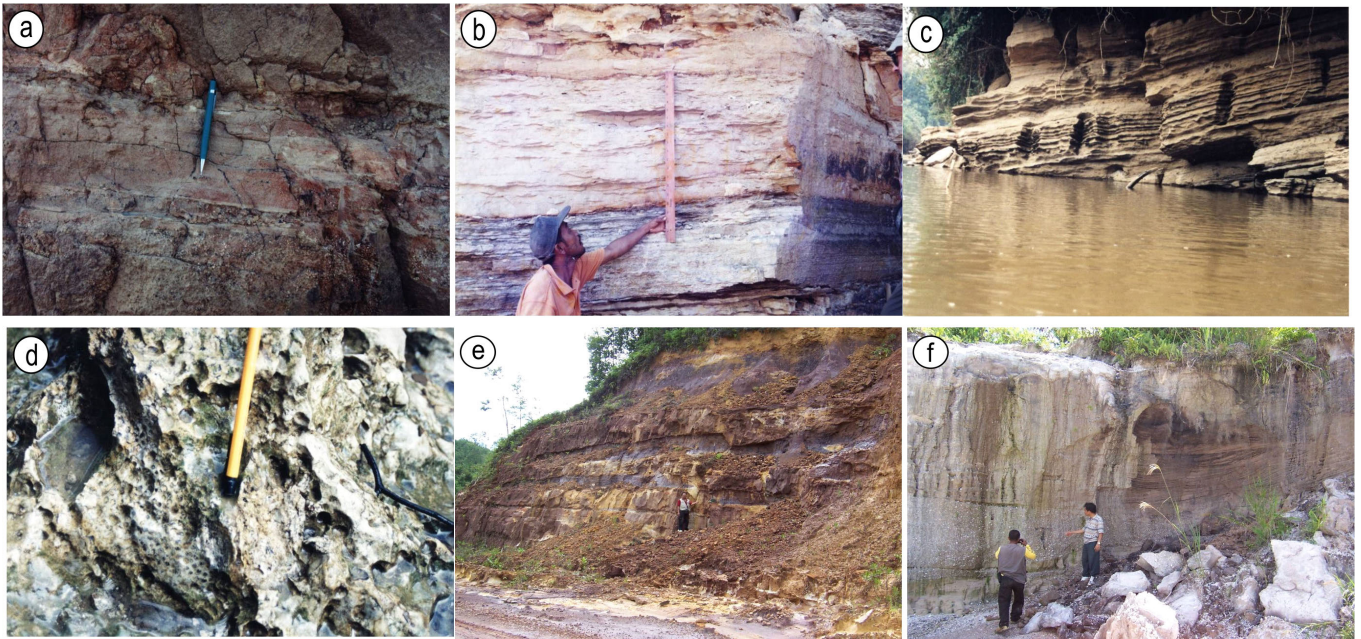


Fig. 7. Outcrop photos showing typical lithology of Barito Basin. (a) Red-colored sandstone beds (red beds) of Tanjung Formation in Miyawa area. (b) Gray sandstone beds of Tanjung Formation, intercalated by thin layers of black shale in Desa Lima area. (c) Bedded limestone of Berai Formation at Lemo River. (d) Coralline limestone of Berai Formation at Lemo River. (e) Interbedded sandstone and claystone of Warukin Formation at Kuala Kurun area. (f) Conglomeratic sandstone of Dahor Formation at Kahayan River.

던 해침의 영향으로 연안(nearshore) 퇴적상이 우세하다. 연안 퇴적상은 얇은 층리가 발달하는 세립질의 이질 사암, 사층리가 잘 발달하고 상향조립화하는 사암으로 구성된 조간대 사주 또는 해안 사주(shoreline barrier), 전삼각주에서 퇴적된 세립질암으로 구성된다. 퇴적단계-4(Stage-4) 퇴적층은 주로 저에너지 심도의 아연안(sub-littoral) 환경에서 퇴적되었다. 이 시기는 분지 침강이 매우 안정된 시기로 중기 올리고세까지 지속되었다. 단위층 내에 해침(transgression)과 해퇴(regression)로 인한 소규모 주기성 퇴적 기록이 나타나는 것이 특징이다. 해침 시기에는 해양성 세일과 이회암이 우세하고, 해퇴 시기에는 석회질의 조립질 쇄설성 및 석탄 입자들이 협재한다. 퇴적단계-4 퇴적층은 상부 탄정층에 대비된다.

베라이층은 탄정층을 부정합 관계로 덮고 있으며, 암상의 변화를 바탕으로 하부, 중부, 상부로 구분된다(Fig. 6a). 하부 베라이층은 석회암과 이회암의 교호층이며(Fig. 7c), 중부 베라이층은 괴상의 플랫폼 석회암과 산호초 석회암이 우세하고, 상부 베라이층은 석회암, 실트암, 이회암이 교호하는 퇴적층이다. 하부 베라이층은 산호초 대지(reefal platform), 하부 베라이층은 전삼각주 퇴적상으로 해석된다. 베라이층은 바리토 분지뿐만 아니라, 주변의 아셈-아셈(Asem-Asem) 분지, 파시르(Pasir) 분지에서도 잘 나타나고, 북쪽으로는 쿠타이 분지의 본간층(Bongan Formation)과 서로 교차하며 나타나는 것이 특징이다(van de Weerd *et al.*, 1987). 퇴적 시기는 올리고세-전기 마이오세로 알려져 있다.

와루킨층은 바리토 분지 북쪽의 유전 지역에서 잘 관찰되고, 하부의 베라이층을 정합적으로 덮고 있다. 암상에 따라 크게 세 부분으로

분대가 가능하다(Fig. 6a). 즉, 하부의 세일층, 중부의 사암층, 상부의 석탄층으로 나눌 수 있다(Siregar and Sunaryo, 1980). 이들 퇴적층들은 해안선이 바다쪽으로 전진하면서 발달한 근해-삼각주(paralic-deltaic) 환경에서 주로 퇴적되었다. 층후는 약 1,000~3,000 m로 알려져 있고, 퇴적 시기는 마이오세이다.

다호층은 주로 사암과 점토로 구성된 미성숙(immature) 퇴적층으로 하부의 와루킨층을 부정합 관계로 덮고 있다. 층후는 약 600 m에 이르고, 매몰심도가 낮아서 석유시스템 형성에 불리하다. 그러나, 메라투스 기반암이 융기한 지역을 따라 상대적으로 두껍게 분포할 것으로 예상되며, 이 지역에서는 매몰 심도가 근원암 생성에 도달했을 수도 있다. 퇴적 시기는 플라이오세-플라이스토세이다.

5.2. 바리토 분지 퇴적환경 발달

신생대 초기에 테티스해 해양지각이 순다대지 아래로 사교섭입하면서 바리토 지역에 신장력이 작용해 북서-남동 방향의 열개 시스템이 발달하였다. 이로 인해 퇴적가능공간이 형성되어 충적선상지 퇴적물과 호성 퇴적물로 이루어진 하부 탄정층이 퇴적되기 시작하였다(Rotinsulu *et al.*, 1993; Satyana *et al.*, 1999). 중기 에오세 동안 해침이 일어나 퇴적환경이 하천-삼각주 환경으로 변하였고, 그 이후에도 지속적인 해침으로 해양환경이 우세하게 발달하였다. 이런 지속적인 해침 환경에서 만들어진 퇴적층이 중부 탄정층이다. 후기 에오세-전기 올리고세에는 해양성 세일로 구성된 상부 탄정층이 광역적으로 형성되었다(van de Weerd and Armin, 1992; Rotinsulu *et al.*, 1993; Satyana *et al.*, 1999). 에오세 동안 칼리만탄의 남동

부는 연안환경이, 북동부는 해양환경이 우세하였다. 퇴적물들은 서부와 북서부 지역의 순다대지 용기부에서 공급되었으며, 주로 연안, 하천-호수 환경에서 퇴적되었다(Satyana *et al.*, 1999)(Fig. 8a).

중기 올리고세에 해퇴가 광역적으로 일어났고, 이는 오스트리아 판과 필리핀판의 충돌에 기인한 것으로 여겨진다. 이 후 소분지의 발달로 올리고세-마이오세 시기에 해침이 재발되어 남동부 칼리만탄의 남부와 북부 지역 일부는 탄산염 퇴적환경이 우세하였고, 분지 중심 지역에서는 연안, 해양 환경이 우세하게 발달하였다(Satyana *et al.*, 1999). 바리토 분지에서 수심이 얕은 해양 환경에서 퇴적된 베라이층의 탄산염 플랫폼이 후기 올리고세에 발달하였다(Fig. 8b)(van de Weerd and Armin, 1992; Rotinsulu *et al.*, 1993; Satyana *et al.*, 1999). 베라이층의 탄산염암은 플랫폼 탄산염 또는 쇄설성 탄산염이고 특정지역에서는 산호초 탄산염(reef carbonate build-up)의 가능성도 있다. 이러한 탄산염암의 퇴적은 전기 마이오세까지 지속되었고, 서쪽으로부터 공급되는 쇄설성 퇴적물의 유입으로 인해 탄산염암 퇴적이 증진되었다.

마이오세에 스코와나 산맥과 메라투스 산맥의 융기로 인하여 해퇴가 일어났고, 이로 인해 대부분의 남동부 칼리만탄 지역에 연안 환경이 만들어졌다. 융기된 지역으로부터 퇴적물이 유입되어 바리토 분지에는 동쪽으로 전진구축하는 삼각주 퇴적층이 발달하였다(Fig. 8c). 후기 마이오세에 들어와 메라투스 산맥이 다시 융기하여 바리토 분지의 지각평형적 침강(isostatic subsidence)을 일으킨다. 이런 융기로부터 유입된 퇴적물이 수 천 미터 두께의 와루킨층을 형성하였다(van de Weerd and Armin, 1992; Rotinsulu *et al.*, 1993; Satyana *et al.*, 1999).

메라투스 산맥의 융기는 플라이스토세까지 지속되어 충상단층 활동이 활발해지고, 몰라세-삼각주(molassic-deltaic) 퇴적물인 플라이오세의 다호층이 퇴적되었다(van de Weerd and Armin, 1992; Rotinsulu *et al.*, 1993; Satyana *et al.*, 1999). 이러한 구조적 퇴

적 양상은 현재까지도 바리토 지역에 영향을 주고 있다(Satyana *et al.*, 1999).

5.3. 쿠타이 분지 층서 및 퇴적환경

쿠타이 분지는 에오세 동시열개 시기에 일련의 반지구대 구조들이 형성되면서 시작되었다. 퇴적물 공급이 원활하게 이루어지는 분지 서쪽 지역에서는 충적선상지 퇴적상이 우세하게 나타나고, 동쪽 지역에서는 해양 환경이 우세하였다(Fig. 8a). 해침과 침강의 영향으로 서쪽 지역의 용기부에서는 육지성, 천해/연안-대륙붕 환경으로부터 반심해성 환경으로 퇴적환경이 변하지만, 동쪽 지역의 용기부에서는 열개시기부터 해양환경이 우세하여 서쪽 지역의 용기부보다 더 빨리 반심해성 환경이 만들어지게 된다(Moss and Chambers, 1999). 따라서 동시열개 육성 퇴적상이 상부 쿠타이 분지의 키함할로쿠층(Kiham Haloq Formation)에서 잘 나타나고, 바리토 분지에서는 탄정층과 대비된다(Fig. 6b)(Wain and Berod, 1989; Moss *et al.*, 1997; Moss and Chambers, 1999).

후기 에오세에서 올리고세의 침강 단계(sag phase)에서는 동부 칼리만탄 지역의 응력이 감소하기 시작하고, 광역적인 침강이 나타난다. 그래서 분지의 많은 부분이 물에 잠기게 되어 국부적인 퇴적중심지 대신 광역적인 퇴적중심지가 발달한다. 이러한 환경의 변화로 형성된 광역적인 세일 퇴적층이 아탄층(Atan Formation)이다(Figs. 6b and 8b). 이 퇴적층은 동시열개 퇴적층과 그 주변의 기반암을 모두 덮고 있다. 이와 함께 천해 환경에서 퇴적된 두꺼운 탄산염암이 발달하는데, 이를 바투바레 석회암 층원(Batu Baleh Limestone Member) 또는 케단고층(Kedango Formation)이라 하며, 바리토 분지의 베라이층에서 발달하는 탄산염암과 연대가 유사하다(Fig. 6b)(Moss and Chambers, 1999).

전기 마이오세에 쿠타이 분지 북서 지역에서 융기가 일어나고, 분지에 마이오세 퇴적물 공급이 이루어졌다. 융기 지역에서 멀리 떨어

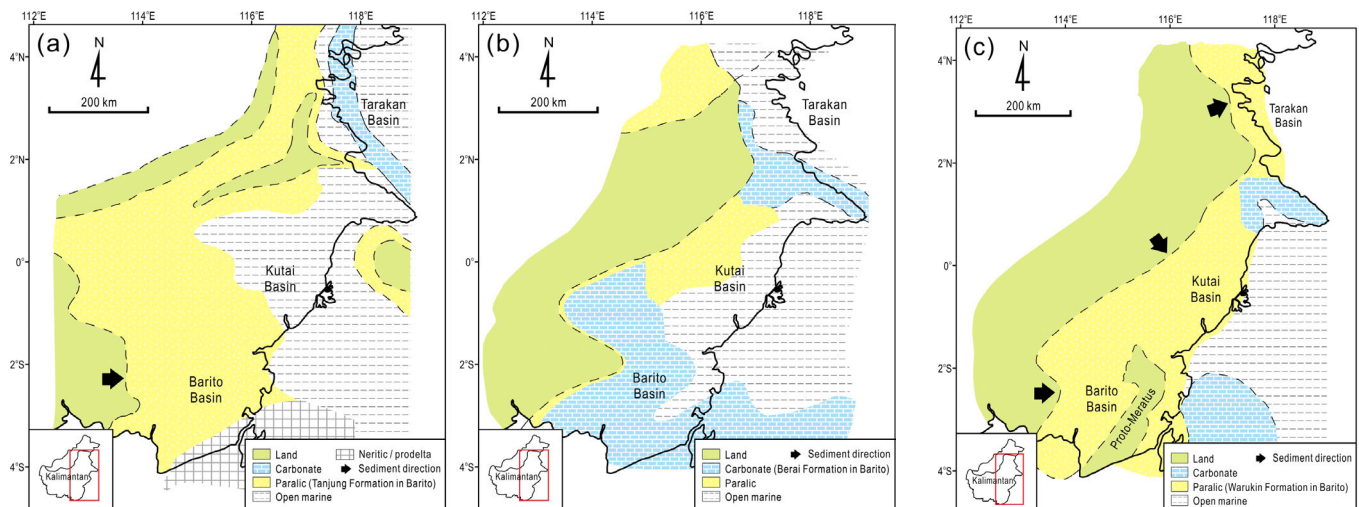


Fig. 8. Paleogeographic maps of Southeastern Kalimantan during (a) Eocene, (b) Oligocene to Miocene, and (c) middle to upper Miocene (modified from PERTAMINA, 1980).

저 있는 분지의 동쪽 지역에서는 침강 단계의 퇴적상(sag phase facies)이 나타나고, 기존에 발달해 있던 탄산염 플랫폼 지역 및 지형적으로 높은 지역에서 탄산염 플랫폼 퇴적상이 나타난다(Moss and Chambers, 1999). 지속적인 용기와 더불어 광역적인 해퇴가 일어나, 기존의 마하캄강(proto-Mahakam River)에서 전진퇴적하는 삼각주 시스템이 발달하기 시작하였다. 전기 마이오세 삼각주 퇴적상은 기존에 퇴적된 두꺼운 저탁암, 반심해성 셰일과 점이적인 관개로 발달한다(Moss and Chambers, 1999). 이 시기에 삼각주 퇴적물로 구성된 푸루바랑층(Pulau Barang Formation)이 퇴적되었다(Fig. 6b). 퇴적물의 공급은 용기에 의한 기반암의 침식과 신탕 화산활동(Sintang volcanism)에 의한 화산쇄설물들이 주를 이루었다.

중기 마이오세에 마하캄 삼각주 퇴적층은 구조역전에 의해 만들어진 사마린다 북배사 지역에서 마카사르 해협까지 퇴적물이 동쪽으로 전진퇴적하였고, 발릭파판층(Balikpapan Formation), 캄퐁바루층(Kampung Baru Formation)이 퇴적되었으며(Figs. 6b and 8c), 현재까지 연안 쿠타이 분지까지 확장하며 퇴적되고 있다(Satyana *et al.*, 1999). 그리고 내륙 사마린다 북배사 지역에서는 호소성 분지(Kutai Lakes Formation)가 발달한다(Moss and Chambers, 1999).

6. 바리토 분지 석유시스템

6.1. 근원암

바리토 분지에서 근원암으로 하부 탄정층과 와루킨층의 셰일, 점토암, 석탄이 유망하다. 이들은 대체로 오일 생성에 유리한 근원암 속성을 가지며, 열적 성숙도는 분지 중심부에서 양호하고, 서쪽으로 갈수록 불량하다. 분지 북쪽 탄정 지역의 시추 결과에 따르면, 하부 탄정층 셰일과 석탄의 총유기탄소량(TOC)은 1-20 wt%이며, 수소지수는 200-400 mg HC/g TOC이다(Heriyanto *et al.*, 1996). 유기물은 주로 육성 식물(탄질)과 호소성 조류 잔해들이 섞여 있다. 탄정층 삼각주 셰일의 총유기탄소량은 0.6-5.4 wt%이며, 협재하는 석탄층의 총유기탄소량은 43.6-65.9 wt%로 매우 높은 것으로 보고되었다(Rotinsulu *et al.*, 1993). 와루킨층 점토암과 셰일의 총유기탄소량은 1.3-4.2 wt%이며, 석탄층의 총유기탄소량은 44.8-59.3 wt%이다. 유기물은 육성 식물 기원의 케로진 타입 III가 우세하며, 주로 비트리나이트로 구성된다. 수소지수(Hydrogen Index)는 탄정층에서 40-130 mg HC/g TOC, 와루킨층에서 60-190 mg HC/g TOC의 범위를 가진다(Rotinsulu *et al.*, 1993).

6.2. 저류암

바리토 분지에서 확인된 저류암은 중기 에오세의 하부 및 중부 탄정층 사암, 중기 마이오세의 하부 및 중부 와루킨층 사암, 후기 올리고세-전기 마이오세의 균열이 발달하는 베라이층 탄산염암이다. 기반암 균열대에서도 오일이 발견된 바 있고, 다호층의 사암도 유망한 것으로 알려져 있다. 탄정층과 와루킨층의 사암은 탄정, 캄비틴(Kambitin), 타피안, 와루킨 유전에서 이미 저류층으로 확인되었고,

베라이 탄산염암 또한 케렌단(Kerendan) 유전에서 가스 저류층으로 확인되었다.

탄정층의 퇴적단계-1 구간에서는 충적선상지 분류하도 사암과 호소성 삼각주 사암이 유망하며, 대개 두께가 30-50 m 정도로 알려져 있다(Satyana, 1994; Marheni *et al.*, 2009). 퇴적단계-2 구간의 충적평원 하도 사암은 분급이 매우 양호하고 두께가 25-30 m에 이르며, 평균 공극률이 20%, 평균 투과도가 156 mD로 알려져 있다(Satyana, 1994; Marheni *et al.*, 2009). 퇴적단계-3 구간에서는 해퇴 시기에 퇴적된 해안 사주 사암이 유망하다. 탄정 유전의 생산층인 탄정층 사암은 충적선상지의 망상하천에서 퇴적된 역질 사암으로 평균 공극률 21%, 투과도는 10-100 mD 정도로 보고되었다(Aslam *et al.*, 2017).

와루킨층의 저류암은 중부 와루킨층 사암으로 두께가 10-30 m에 이르고, 평균 공극률은 25%, 투과도는 20-60 mD 이다. 베라이층에서 유망한 저류암은 산호초 퇴적상으로 주로 가스와 컨덴세이트를 함유하고 있다. 케렌단 유전에서 확인된 베라이층 저류암 공극률은 대개 2-6% 범위에 분포하며 최대 10%까지 나타난다. 투과도는 1-3 mD이다.

6.3. 덮개암

바리토 분지에서 탄화수소의 이동을 막아주는 덮개암 역할이 가능한 암상으로 상부 탄정층 셰일, 베라이층 이회암과 셰일, 와루킨층 내에 협재하는 셰일 등이 있다. 전기 올리고세 해침 퇴적층인 상부 탄정층은 두께가 800 m에 이르며, 주요 저류층인 하부 탄정층을 광역적으로 덮고 있어 효과적인 덮개암 역할을 한다(Satyana, 1994). 와루킨층의 셰일 역시 두꺼운 삼각주 퇴적층내 협재하면서 광역적으로 분포하고 있어 덮개 능력이 유망하다.

6.4. 트랩

바리토 분지의 구조 트랩은 전기 마이오세부터 있었던 압축 구조 운동에 의해 형성되었다. 중기 마이오세까지 현재의 메라투스산 지역이 융기되면서 분지 침강과 더불어 구조 트랩이 형성되었다. 플라이오세와 플라이스토세 동안 분지 전체가 융기되었고, 습곡 및 단층 활동에 의한 변형을 받았다. 이 시기의 구조 운동은 기존에 존재하던 구조 트랩을 파괴하기도 하였다. 분지 북동쪽 지역의 유전 지대에서 발견된 구조 트랩은 역단층 연계 비대칭 습곡구조가 우세하다. 그 밖에도 배사구조, 단층 블록, 균열 탄산염암, 층서적 핀치아웃(pinch-out), 산호초 빌드업(build-up) 등이 가능하다. 분지의 서쪽과 남쪽은 구조적인 변형에 의한 트랩 구조가 거의 관찰되지 않는다. Bon *et al.*(1996)은 분지 북쪽의 변형대와 남쪽의 비변형대를 구분하는 가상의 '탄정 구조선'(Tanjung Line)을 제안하였다(Fig. 3).

6.5. 석유 생성 및 이동

바리토 분지에서 오일의 생성과 배출(expulsion)이 시작된 시기는 대략 20 Ma이며, 중기 마이오세(15 Ma)에 본격적인 배출이 있었

다(Satyana, 1994). 이 시기에 하부 탄정층의 열적 성숙도가 탄화수소 생성 단계에 도달하였다. 특히, 분지 북동쪽 지역에서 오일은 대개 4,000 m 심도에서 생성되기 시작하였고, 심도가 얕아지는 서쪽과 동쪽 방향으로 이동하기 시작하였다. 후기 마이오세에 탄정층은 이미 열적으로 성숙하였고, 이 시기에 메라투스 산맥이 융기하면서 분지 역전이 일어나 구조 트랩들이 형성되었다. 이 때 형성된 단층과 투수층을 따라 원유가 이동하여 구조 트랩에 집적되었다. 후기 플라이오세(플라이오세-플라이스토세)에 탄정층과 와루킨층이 더 깊은 심도로 매몰되면서 원유 생성이 광범위하게 일어났고, 와루킨층에서도 원유를 생성하기 시작하였다(Satyana *et al.*, 1999). 플라이오세에 일어난 구조 운동에 의해 기존의 트랩들이 파괴되었고, 새롭게 형성된 트랩들로 재이동이 일어나 원유가 집적되었다(Rotinsulu *et al.*, 1993). 현재 오일 윈도우($Ro = 0.65$ to 1.3)는 4,000-5,000 m 심도에 위치하고, 가스 윈도우($Ro > 1.3$)는 6,000 m 이하 심도에 위치한다.

분지 중심부에 위치한 타피안 티무르(Tapian Timur), 파린긴(Paringin), 방카우(Bangkau), 미야와(Miyawa) 지역에서 탄정층의 근원암은 오일/가스 생성 잠재성이 높다(Rotinsulu *et al.*, 1993).

메라투스 충상 단층대 전면부 심부에 분포하는 하부 탄정층은 현재 가스/컨덴세이트를 생성하고 있을 것으로 예측된다(Fig. 9a). 상대적으로 얕은 곳에 분포하는 와루킨층 셰일의 열적 성숙도는 일부 깊은 지역에 국한되어 양호하게 나타난다. 특히, 파린긴, 방카우 지역은 이미 오일을 생성할 수 있을 정도로 성숙하였고, 와루킨 유전과 타피안 티무르 유전에 오일을 공급하는 키친 영역이다(Fig. 9b) (Rotinsulu *et al.*, 1993).

7. 쿠타이 분지 석유시스템

7.1. 근원암

쿠타이 분지의 주요 근원암은 마이오세-플라이오세 동안 삼각주 환경에서 퇴적된 석탄질 셰일, 탄산염 셰일과 해양성 셰일이다. 대부분의 근원암은 중기 마이오세의 바릭파판층과 후기 마이오세-플라이오세의 캄퐁바루층에 해당되며, 이들은 2.6 km보다 깊은 심도에서 나타난다. 대체로 해양성 셰일은 총유기탄소량이 낮은 근원암으로 알려져 있다. 반면에 삼각주 평원에서 퇴적된 셰일은 상당한 양의 유기물과 석탄질 물질들을 포함하고 있어 쿠타이 분지에서 가장 좋은 근원암($Ro = 0.35$ - 0.6%)을 형성한다(Burrus *et al.*, 1992).

7.2. 저류암

쿠타이 분지의 주요 저류암은 중기 마이오세-플라이오세의 바릭파판층과 캄퐁바루층에 속하는 삼각주 사암 퇴적층이다. 삼각주 사암 퇴적층은 동-서 방향이 우세한 분류 하도(distributary channels)와 조석이 우세한 삼각주의 전면부/하도에서 퇴적된 사암으로 구성된다. 분류 하도 사암은 높은 공극률과 투수율을 가지는 가장 양호한 저류암이다. 그러나, 저류암의 품질은 깊이가 깊어지면서 속성작용의 영향을 받아 감소한다. 삼각주 사암 다음으로 저탁류 사암과 탄산염 암초(reef)가 유망하다(e.g., Dunham *et al.*, 2001). 탄산염 암초는 주로 올리고세에서 전기 마이오세 동안에 형성되었고, 내대륙 봉 중심부나 저해수면 시기의 삼각주 경계부에 제한적으로 분포한다. 그밖에 과압화된(overpressured) 에오세 지층과 올리고세의 탄산염암 지층에서도 탄화수소가 일부 발견되었다.

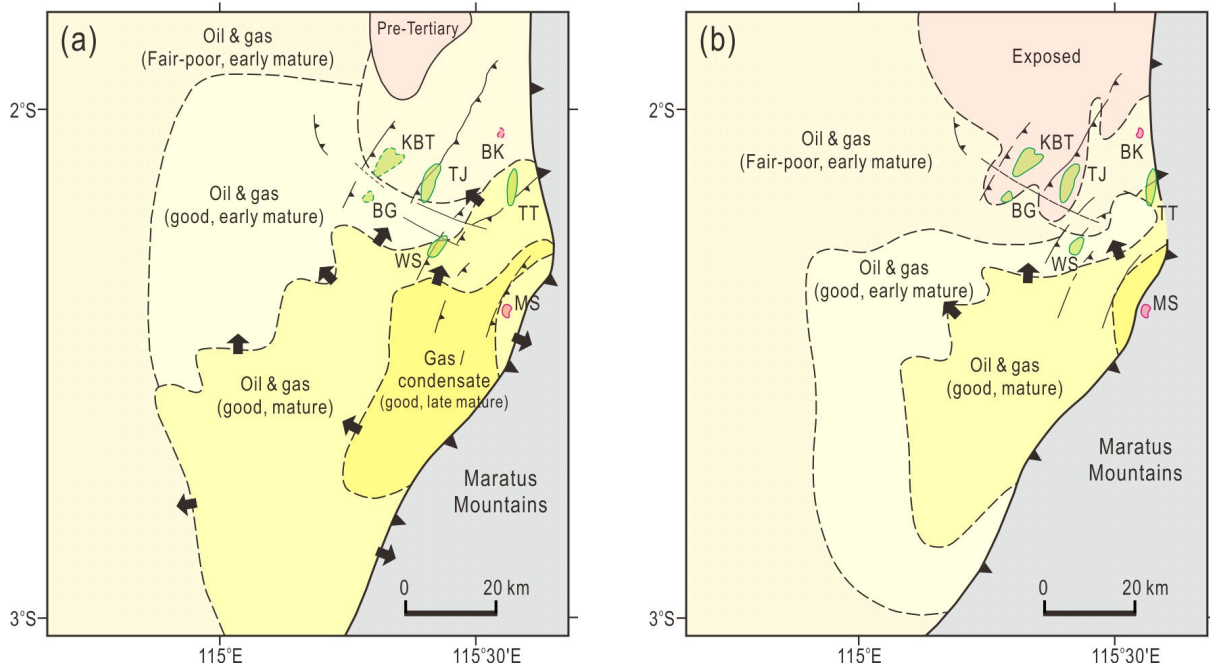


Fig. 9. Hydrocarbon generation and migration pattern map of (a) Tanjung Formation and (b) Warukin Formation (after Rotinsulu *et al.*, 1993). KBT = Kambitin; TJ = Tanjung; BK = Bongkang; TT = Tapian Timur; BG = Bagok; WS = Warukin Selatan; MS = Minyak Selatan.

7.3. 덮개암

쿠타이 분지에는 광역적으로 분포하는 덮개암이 존재하지 않고, 층내에 협재하는 셰일, 실트암, 탄산염 셰일 등이 덮개 역할을 한다. 층내에 협재한 셰일은 횡적 밀폐 능력은 낮지만 수직적 밀폐성이 양호하다. 단속적으로 일어나는 삼각주 전진구축이 덮개암의 횡적 불연속성에 영향을 끼쳤다. 압력 전이대(pressure transition zone)에 있는 삼각주 전면부 셰일은 탄화수소의 모세관 밀폐(hydrocarbon capillary seal)에 큰 영향을 준다.

7.4. 트랩

쿠타이 분지는 중기 마이오세-플라이오세의 바리파판층과 캄퐁바루층에 발달하는 구조 트랩이나 구조-층서 조합 트랩이 유망하다. 전형적인 트랩 형태는 단층으로 닫힌 배사구조들(four-way structural dip closure, fault dip closure, and crestal faulted closure)이다. 이러한 구조 트랩들은 분지의 열개, 확장, 수축, 삼각주 퇴적층의 누적과 관련된 구조적 진화와 관련되어 발달하였다. 분지 열개와 관련하여 초기에는 배사구조가 나타나고, 중기 마이오세까지 분지 수축에 의한 습곡 및 층상단층에 의해 향사구조가 발달하였다. 향사구조들은 정부가 좁고 경사가 급한 만곡을 가지면 길게 신장되어 연속적으로 분포한다. 성장단층에 의한 구조들은 분지가 닫히는 후기 마이오세와 플라이오세에 형성되었다. 삼각주 전면부에 퇴적물들이 두 겹께 누적되면서 성장단층들과 습곡들의 발달이 용이하였다(Ferguson and McClay, 1997).

7.5. 석유 생성과 이동

마하캄 삼각주의 해안선을 따라 형성된 대규모 습곡 구조를 따라 발견된 유전들은 향사구조 아래쪽에서 탄화수소가 형성되고, 경사상방(up-dip)으로 이동되어 배사구조에 집적되는 것으로 알려져 있다. 탄화수소의 생성과 이동은 주로 후기 마이오세에 시작되었으며, 후기 플라이오세 이후에 최대로 집적되었다. 오일 생성 구간은 3,500-

4,000 m 심도, 가스 생성 구간은 5,000-6,000 m 심도로 알려져 있다. 탄화수소의 이동은 고하도의 발달 방향과 하도 사암체의 상호 연결성에 의해 조절되었고, 단층면을 따라 위쪽으로는 이동은 제한적인 것으로 보고되었다. 에오세 쇄설성 퇴적암과 올리고세 탄산염암의 경우, 상업적으로 양이 충분하지 않고, 과성숙된 상태로 상당히 용기되어 있다.

8. 토의

8.1. 바리토 분지와 쿠타이 분지 석유시스템 발달 비교

칼리만탄 남동쪽에 서로 인접하여 분포하는 바리토 분지와 쿠타이 분지는 양호한 조건의 근원암, 저류암 및 구조 트랩이 형성되었으며, 석유의 생성, 이동 및 집적의 과정이 잘 밝혀져 있다(Table 1). 그럼에도 불구하고 바리토 분지는 쿠타이 분지와 비교할 때 현재까지 유전이 매우 한정된 지역에서 발견되었고, 상대적으로 생산량도 적은 것이 특징이다(Mason *et al.*, 1993). 이러한 차이를 이해하기 위해 두 분지의 석유시스템 발달 과정을 살펴볼 필요가 있고, 이는 열개 분지의 구조적 진화와 석유시스템 발달 유형의 차이를 이해하는데 좋은 사례가 될 것이다.

바리토 분지는 고신생기(Paleogene) 신장력에 의해 열개 시스템이 형성되었고, 지구대 내에 호소성 환경이 형성되면서 근원암이 될 수 있는 호소성 셰일과 석탄(하부 탄층)이 형성되었다. 중기 에오세 해침의 결과로 하천-삼각주 환경으로 변하면서 저류암이 될 수 있는 사암(하부 탄층)이 퇴적될 수 있었다. 지속적인 해침환경에서 구조적으로 침강하고 잠기게 되면서 광역적으로 셰일이 퇴적되었고(상부 탄층), 이는 저류암 위에 놓이면서 중요한 덮개암이 될 수 있었다. 중기-후기 마이오세에 메라투스 산맥의 용기에 의해 분지가 역전되어 비대칭 분지로 진화하였다. 이 시기에 분지의 중심부(fore deep)가 급격히 침강하였고, 이로 인해 근원암이 급격히 매몰되어 탄화수소가 생성될 수 있는 키친영역에 도달할 수 있었다. 구조역전에 의해

Table 1. Summary of petroleum systems in Barito and Kutai basins.

	Barito Basin		Kutai Basin		
Petroleum system type	Syn-rift graben-fills (Tanjung)	Post-rift deltaics (Warukin)	Post-rift deltaics of Oligocene	Post-rift deltaics of Miocene	Post-rift turbidites of Miocene to Pliocene
Source rock	Mature shale of Paleocene to early Oligocene	Mature shale of Miocene	Mature shale of Oligocene	Mature shale of Early Miocene	Mature shale of Early Miocene
Migration	via fault zone, lateral and vertical	via fault zone, lateral and vertical	via fault zone	via fault zone, updip migration	via fault zone, updip migration
Reservoir rock	Eocene alluvial fan sandstone	Middle Miocene deltaic sandstone	Oligocene deltaic sandstone and reefal carbonate	Miocene deltaic sandstone	Mid-Late Miocene to Pliocene turbidite sandstones
Trap and seal	Major structural traps, shale and fault seals	Structural and stratigraphic traps, shale and fault seals	Major structural traps, shale and fault seals	Structural and stratigraphic traps, shale and fault seals	Structural and stratigraphic traps, shale and fault seals

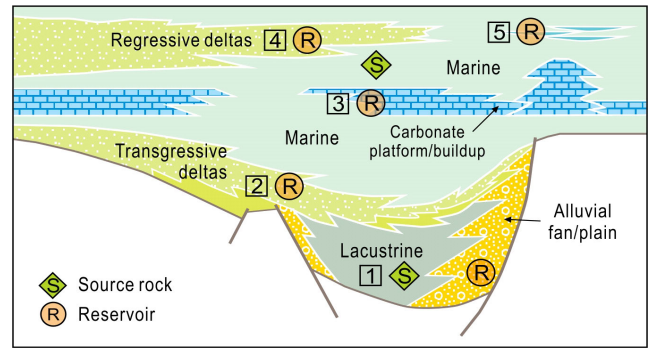
형성된 북북동-남남서 향사대가 형성되었고 분지의 퇴적 중심지에서 발생한 탄화수소들이 이동하여 구조적 트랩에 채워지게 되었다. 이후 플라이스토세까지 지속된 메라투스 산맥의 융기로 분지가 더 깊어져 와루킨층의 일부도 키친 영역에 도달하였다. 하부 와루킨층의 셰일과 탄산염 셰일이 근원암으로 가능하며 플라이오-플라이스토세에 석유가 생성되어 베라이층의 석회암, 중부 와루킨층의 사암으로 이동 및 집적될 수 있다. 따라서, 바리토 분지의 주요 석유시스템은 탄정층에서 확인된 동시열개 단계 유형과 와루킨층에서 확인된 후열개 단계 유형에 해당된다(Table 1, Fig. 10)(Doust and Sumner, 2007). 와루킨층 석유시스템은 확인되었으나 생산량이 많지 않다.

현재 유전들은 분지 북동쪽의 탄정 지역에 주로 분포하며 대부분 동시열개성 탄정층에서 생산이 이루어진다. 분지 북동쪽 지역에 국한되어 매몰 심도가 깊어 탄화수소가 생성될 수 있었고, 남쪽 지역은 상대적으로 매몰 심도가 낮아서 석유 생성이 충분하지 않았다. 바리토 분지의 북쪽과 남쪽의 매몰 심도가 다른 것은 메라투스 산맥이 북쪽에서 먼저 융기하였고, 남쪽으로 가면서 나중에 융기되어 남쪽 전면부의 침강이 늦었기 때문이다(Witts *et al.*, 2014). 이러한 차이로 인해 바리토 분지에서는 충분한 근원암이 있었음에도 불구하고 상대적으로 적은 양의 석유가 생성되었고, 대규모 유전이 형성되기 어려웠다.

쿠타이 분지는 후기 마이오세까지 바리토 분지와 유사한 퇴적환경에서 퇴적물들이 퇴적되었다. 하지만 북부 칼리만탄의 충돌로 인한 칼리만탄 중앙 산맥 지역의 융기는 상부 쿠타이 분지를 융기시켜 분지 형성 초기에 쌓인 퇴적층들이 석유를 생성할 수 있는 키친영역까지 매몰되지 못하게 하였다. 반면에 융기된 지역에서 삭박된 마이오세 퇴적물들이 후열개 시기 동안 마카사르 해협 쪽으로 운반되어 전진구축하는 삼각주 퇴적층을 형성하였다. 삼각주 퇴적층은 빠르게 매몰되어 키친 영역에 도달하였고, 중기 마이오세의 분지 역전과 후기 마이오세-플라이오세의 성장단층 발달에 따른 구조 트랩에 석유가 집적되어 현재 마하캄 삼각주 지역에 다수의 유전들을 형성하였다. 따라서, 쿠타이 분지에서는 동시열개 유형의 석유시스템이 발달하지 않았고, 후열개 단계에 형성된 세 개의 석유시스템이 확인되었다(Table 1, Fig. 10)(Doust and Sumner, 2007).

메라투스 산맥은 아당 단층대 남쪽의 바리토 분지에서만 융기하였고, 북쪽의 하부 쿠타이 분지에서는 심부로 연결되었다(Witts *et al.*, 2015). 이와 같이 후열개 시기(중기-후기 마이오세)에 두 분지에 동일한 압축 구조운동이 작용하였으나, 메라투스 산맥이 차별적으로 융기함에 따라 바리토 분지와 쿠타이 분지의 석유시스템 발달 양상이 서로 달랐던 것으로 해석된다. 두 분지의 경계를 이루는 아당 단층대는 고신생기 분지 발달과 더불어 형성된 북서-남동 방향의 지질 구조로 알려져 있지만, 단층대의 성격과 구조적 진화에 대한 연구가 부족하다.

요컨대 칼리만탄 지역의 마이오세 압축 구조 운동 동안 두 분지의 고지리적 위치와 융기대와의 인접성에 따라 서로 다른 석유시스템 유형이 발달하였다. 바리토 분지는 메라투스 산맥의 융기 활동에 의한 전면부 침강이 남-북 방향으로 달랐고, 상대적으로 북쪽 전면부



- 1 Early syn-rift graben-fill PS (Tanjung Fm., Barito Basin)
- 2 Late syn-rift transgressive deltaic PS (untested)
- 3 Post-rift carbonate platform PS (Beraí Fm., Upper Kutai Basin)
- 4 Post-rift regressive deltaic PS (Warukin Fm., Barito Basin and Balikpapan to Kampung Baru Fms., Kutai Basin)
- 5 Post-rift turbidites PS (Balikpapan to Kampung Baru Fms., Kutai Basin)

Fig. 10. Development of petroleum system (PS) related to rift basin evolution from rift to post-rift (foredeep subsidence) stages (modified from Doust and Sumner, 2007). Details of petroleum system are summarized in Table 1.

지역이 깊게 침강하면서 동시열개성 탄정층에서 주로 석유가 생성되고 집적되었다. 상부 쿠타이 분지의 동시열개 퇴적층은 칼리만탄 중앙 산맥과 인접한 고지리적 특성으로 인해 융기와 침식을 겪어 석유시스템이 발달하기 어려웠다. 반면에 삭박된 퇴적물들은 후열개 동안 하부 쿠타이 분지에 두꺼운 삼각주 퇴적층을 형성하였고, 양질의 석유시스템이 발달하였다.

8.2. 바리토 분지 탐사 잠재성

현재 바리토 분지에서 추가적인 탄화수소를 찾아내기 위해서 다음과 같은 목표들에 대해 지속적인 탐사와 조사가 이루어져야 한다 (Fig. 11). 바리토 분지의 첫 번째 목표는 탄정층이다. 바리토 분지에서 가장 중요한 석유시스템을 차지하고 있는 탄정층은 아직까지 그 분포가 확실히 밝혀지지 않았다. 보다 정밀한 지구물리 탐사와 지질 조사를 통하여 분포지역을 정확히 알게 된다면 향후 탐사에 큰 도움이 될 것이다. 그리고 탄정층에 발달하고 있는 고구조(paleo-structure)를 확인하는 조사가 필요하다. Satyana (1995)는 메라투스 산맥의 융기 이전에 있었던 후기 에오세, 후기 올리고세 시기 조구조 운동에 의한 부정합면이 존재함을 제시하였다. 바리토 지역의 탄화수소 이동은 마이오세 시기에 이루어졌기 때문에 그 전에 만들어진 구조들은 충분히 트랩의 역할을 할 수 있다. 즉, 메라투스 산맥의 융기에 의해 파괴되지 않고 남아 있는 구조 트랩을 탐사할 필요가 있다. 이와 더불어 아직 탐사가 부족한 바리토 분지 북서쪽 지역의 탄정층 석유시스템도 잠재성이 높다.

다음으로 와루킨층의 분포를 정확하게 파악하고, 추가 잠재성을 확인하는 과정 또한 중요하다. 와루킨층은 플라이오세-플라이스토세 시기에 키친영역에 도달했고, 현재까지도 북서-남동 방향의 압축력이 작용하고 있어 지속적인 침강으로 탄화수소 생성 가능성이 점차

높아질 수 있다. 1965년부터 중부 와루킨층에서 석유를 생산하기 시작한 와루킨 유전의 경우, 누적 생산량이 13.01 MMBO 달하고, 남은 오일량은 3.87 MMBO 정도로 매우 성숙된 유전이다(Harun *et al.*, 2017). 중부 와루킨층의 주요 저류암인 하성 삼각주 사암(fluvial deltaic sandstone)은 연결성이 불량하여 수공법(waterflood)과 같은 오일회수증진 기술을 적용하기 어렵다. 또한, 최근 와루킨 유전 주변의 시추 결과에 의하면 현재 생산층보다 깊은 하부 와루킨층의 사암이 층서 트랩을 이루면서 석유를 집적하고 있고, 인근 유전(타피아 타이무르)으로 연결되어 있는 것으로 보고되었다(Harun *et al.*, 2017). 이러한 탐사 결과들은 분지 북동부의 성숙 유전에 대해 오일회수증진 기술을 적용하는 것보다 심부에 존재하는 추가 생산층을 개발하는 것이 보다 효율적일 수 있음을 보여준다.

마지막으로 바리토 분지에서 탐사가 미흡한 서쪽 지역(West Barito High or Barito Platform)의 석유 잠재성에 대한 조사가 필요하다. 이 지역은 분지 서쪽 경계와 가까울 정도로 주요 유전이 분포하는 북동부 지역으로부터 멀리 떨어져 있고, 기반암이 얇아서 잠재성이 낮은 것으로 인식되었다. 최근에 바리토 분지 동쪽의 심부에서 생성된 오일이 서쪽으로 먼 거리(>100 km)를 이동하여 이 지역의 트랩에 집적되었을 가능성이 제시되었다(Fig. 11, Fig. 12)(Kleibacker *et al.*, 2015). 이 경우, 무엇보다도 생성된 원유가 먼 거리를 이동할 수 있는 운반층이 필요하다. 바리토 분지의 동시열개성 퇴적층인 기저 역암과 사암이 오일의 장거리 이동을 도와주는 운반층으로 가능하고, 상부에 올라오는 상부 탄정층 이암, 하부 베라이층은 이동 중에 좋은 덮개층 역할을 할 수 있다(Kleibacker *et al.*, 2015). 주요 트랩은 기반암 용기부를 따라 형성된 플랫폼 탄산염암의 층서적 관계, 매몰된 구릉(buried hill), 다짐작용에 의한 배사구조(anticlinal compaction drapes), 탄산염 빌드업(build-up) 등을 고려할 수 있다(Fig. 11).

상부 쿠타이 분지 지역에 위치한 케렌단(Kerendan) 유전의 상부 베라이층 탄산염암에서 가스 발견이 있었다(Fig. 12). 베라이층 탄산염암은 바리토 분지 서쪽 지역에도 연결되어 분포하고 있다. 따라서, 메라투스 산맥 전면부에서 생성된 석유가 서쪽으로 먼 거리를 이동

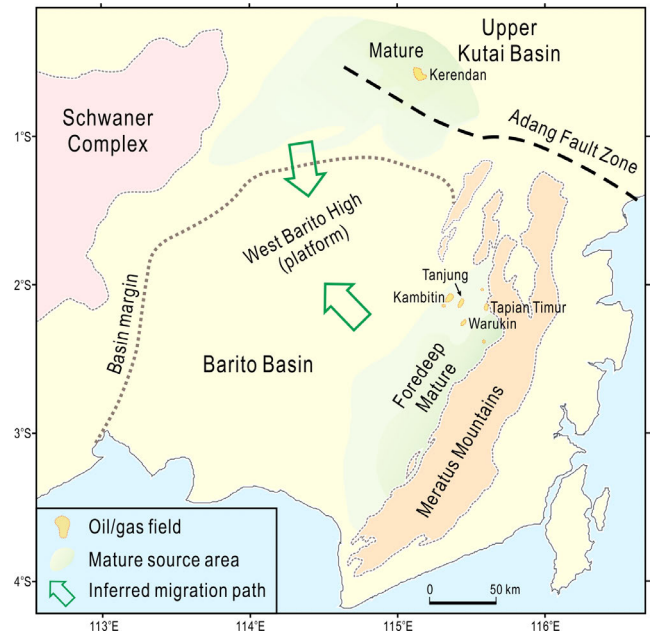


Fig. 12. New prospective area (West Barito High) for oil and gas exploration in Barito Basin (after Kleibacker *et al.*, 2015). Petroleum possibly migrated from the proven Barito and Upper Kutai basins.

하였을 가능성과 더불어 가까운 북쪽의 상부 쿠타이 분지에서도 석유 생성 및 이동이 가능했을 것이다(Subekti *et al.*, 2015; Nugroho *et al.*, 2016). 이러한 발견으로 인해 바리토 분지 서쪽 용기 지역과 상부 쿠타이 분지에 대한 탐사 유망성이 최근에 고조되고 있다(Atkinson *et al.*, 2017).

9. 결론

인도네시아 칼리만탄 남동부에 위치하는 바리토 분지와 쿠타이 분지는 퇴적환경이 매우 유사한 특징을 나타내지만, 조구조적인 영향과 분지가 발달한 위치의 차이로 인해 석유시스템 발달이 서로 상이하다. 바리토 분지는 열개와 동시에 퇴적된 탄정층의 호소성 퇴적

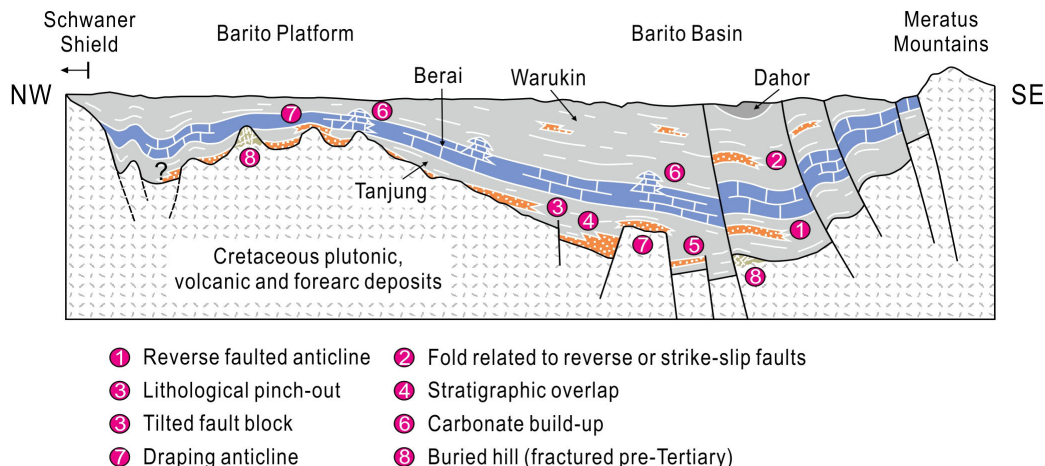


Fig. 11. Possible petroleum traps in Barito Basin. Not to scale.

물이 메라투스 산맥의 용기와 함께 키친영역까지 매몰될 수 있었다. 반면에 마이오세 후열개 퇴적물인 와루킨층은 분지 동쪽의 침강지역 (foredeep) 안에서 상대적으로 얇은 매몰 심도를 겪었다. 플라이오세-플레이스토세 시기에 메라투스 산맥의 용기가 다시 활성화 되고, 분지 북동쪽 지역이 침강하면서 일부 와루킨층이 키친영역에 도달하였다. 이와 대조적으로 쿠타이 분지는 열개 동시성 퇴적물이 칼리만탄 중앙 산맥 지역의 용기로 인하여 키친영역에 해당되는 심도까지 도달하지 못하였고, 마이오세 후열개 퇴적물은 마카사르 해협쪽으로 전진구축하는 대규모 삼각주 퇴적층을 형성하여 깊게 매몰될 수 있었다. 따라서, 바리토 분지에서는 열개 동시성 탄정층, 쿠타이 분지에서는 후열개 삼각주 시스템인 발릭파판-캄퐁바루층이 주요 석유시스템을 형성하고 있다. 향후 바리토 분지에서 추가적인 탄화수소 발견을 위해서는 탄정층의 분포, 탄정층에 발달하는 고구조, 신생대 이전 기반암 저류층, 와루킨층의 분포, 바리토 서쪽 탄산염 저류층에 대한 조사와 탐사가 집중적으로 이루어져야 한다.

사사

본 연구는 한국지질자원연구원 주요 사업(GP2017-024)의 지원으로 수행되었습니다. 일부 결과들은 한국지질자원연구원과 인도네시아의 LEMIGAS가 공동 연구를 수행하여 얻은 결과입니다. 원활한 자료 수집 및 검토에 시간과 노력을 아끼지 않았던 LEMIGAS 연구팀에게 감사드립니다. 건설적인 조언을 해주신 이규호 박사님과 익명의 심사위원님께 감사드립니다.

References

- Aslam, B.M., Ulitha, D., Swadesi, B., Fauzi, I., Marhaendrajana, T., Purba, F.I., Wardhana, A.I., Buhari, A., Hakim, R. and Hasibuan, R., 2017. History match to support interpretation of surfactant flooding pilot test in Tanjung Field. SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, Jakarta, 17-19 October.
- Atkinson, C., Wain, T., Sugiatno, H. and Hayes, S., 2017. Hidden basins and undrilled anticlines: the legacy of early oil exploration in Indonesia. Proceedings of the 2017 South East Asia Petroleum Exploration Society (SEAPEX) Conference.
- Bon, J., Fraser, T.H., Amris, W., Stewart, D.N., Abubakar, Z. and Sosromihardjo, S., 1996. A review of the exploration potential of the Paleocene Lower Tanjung Formation in the South Barito Basin. Proceedings of Indonesian Petroleum Association, 25th Annual Convention, FA96-1.0-027, 1-11.
- Burrus, J., Brosse, E., Choppin de Janvry, G., Grosjean, Y. and Oudin, J.L., 1992. Basin modelling in the Mahakam Delta based on the integrated 2D model Temispack. Proceedings of Indonesian Petroleum Association, 21st Annual Convention (Volume 1), 23-43.
- Chambers, J.L.C. and Daley, T.E., 1997. A tectonic model for the onshore Kutai Basin, East Kalimantan. In: Fraser, A.J., Matthews, S.J., Murphy, R.W. (eds.), Petroleum Geology of Southeast Asia. Geological Society of London Special Publication, 126, 375-393.
- Daly, M.C., Cooper, M.A., Wilson, I., Smith, D.G. and Hooper, B.G.D., 1991. Cenozoic plate tectonics and basin evolution in Indonesia. Marine and Petroleum Geology, 8, 2-21.
- Davidson, J.W., 1991. The geology and prospectivity of Buntan Island, Southeast Sulawesi, Indonesia. Proceedings of Indonesian Petroleum Association, 20th Annual Convention, 209-234.
- Doust, H. and Noble, R.A., 2008. Petroleum systems of Indonesia. Marine and Petroleum Geology, 25, 103-129.
- Doust, H. and Sumner, H.S., 2007. Petroleum systems in rift basins - a collective approach in Southeast Asian basins. Petroleum Geoscience, 13, 127-144.
- Dunham, J.B., Brown, T.J., Lin, R., Redhead, R.B., Schwing, H.F. and Shirley, S.H., 2001. Transport and concentration of gas-and oil-prone kerogens into deep water sediments of the Kutei Basin, East Kalimantan, Indonesia. AAPG Annual Meeting Program and Abstracts, Denver Colorado, p. a54.
- Ferguson, A. and McClay, K., 1997. Structural modelling within the Sanga-Sanga PSC, Kutei Basin, Kalimantan: its implication to paleochannel orientation studies and timing of hydrocarbon entrapment. In: Howes, J.V.C., Noble, R.A. (eds.), Proceedings of the International Conference on Petroleum Systems of SE Asia and Australia, Indonesian Petroleum Association, 727-743.
- Garrard, R.A., Supandjono, J.B. and Surono, 1988. The geology of the Banggai-Sula microcontinent, eastern Indonesia. Proceedings of the Indonesian Petroleum Association, 17th Annual Convention, 23-52.
- Hall, R., 1996. Reconstructing cenozoic SE Asia. In: Hall, R., Blundell, D.J. (eds.), Tectonic Evolution of SE Asia. Geological Society London Special Publication, 106, 153-184.
- Hall, R., van Hattum, M.C.A. and Spakman, W., 2008.

- Impact of India-Asia collision on SE Asia: The record in Borneo. *Tectonophysics*, 451, 366-389.
- Harun, M.R., Ardiansyah, B.N. and Putral, R.T., 2017. Warukin Deep - The hidden potential of Warukin Field, South Borneo: Untouched Reserves in Mature Field. AAPG 2017 Asia Pacific Region Technical Symposium, Bandung, Indonesia, 13-14 September.
- Heriyanto, N., Nawawi, A., Mason, A.D.M., Ingram, F.T., Pedersen, D.E. and Davis, R.C., 1996. Exploratory update in the North Tanjung Block, South Kalimantan. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association*, 25th Annual Convention, 55-68.
- Hutchison, C.S., 1996. The "Rajang Accretionary Prism" and "Lupar Line" problem of Borneo. In: Hall, R., Blundell, D.J. (eds.), *Tectonic Evolution of SE Asia*. Geological Society London Special Publication, 106, 247-261.
- Kleibacker, D., Tasrianto, R. and Saripudin, A., 2015. Long distance migration in Central Kalimantan: a solution to the Barito Dilemma?. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association*, 39th Annual Convention, IPA15-G-085.
- Kusuma, I. and Darin, T., 1989. The hydrocarbon potential of the lower Tanjung Formation, Barito Basin, SE Kalimantan. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association*, 18th Annual Convention, 107-138.
- Larasati, D., Fiqih, F.M., Idris, R., Widarto, D.S. and Sapiie, B., 2015. Fracture shale gas study of Tanjung Formation Barito Basin, South Kalimantan. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association*, 39th Annual Convention, IPA15-G-113.
- Marheni, L., Aditiyo, R., Elyan, A.P. and Anggraeni, E., 2009. Tertiary tectonic of Barito Basin, South East Kalimantan, and implication for petroleum system. *Proceedings PIT IAGI Semarang 2009*, The 38th IAGI Annual Convention and Exhibition, Semarang, 13-14 October.
- Mason, A.D., Haebig, J.C. and McAdoo, R.L., 1993. A fresh look at the North Barito Basin, Kalimantan. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association*, 22nd Annual Convention, 499-606.
- Matthews, S.J. and Bransden, P.J.E., 1995. Late cretaceous and cenozoic tectono-stratigraphic development of the East Java Sea Basin, Indonesia. *Marine and Petroleum Geology*, 12, 499-510.
- McClay, K., Dooley, T., Ferguson, A. and Poblet, J., 2000. Tectonic evolution of the Sanga Sanga Block, Mahakam Delta, Kalimantan, Indonesia. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 84, 765-786.
- Metcalf, I., 1996. Pre-cretaceous evolution of SE Asian Terranes. In: Hall, R., Blundell, D.J. (eds.), *Tectonic Evolution of SE Asia*. Geological Society of London Special Publication, 106, 97-122.
- Moss, S.J. and Chambers, J., 1999. Tertiary facies architecture in the Kutai Basin, Kalimantan, Indonesia. *Journal of Asia Earth Science*, 17, 157-181.
- Moss, S.J., Carter, A., Baker, S. and Hurford, A.J., 1998. A late oligocene tectono-volcanic event in East Kalimantan and the implications for tectonics and sedimentation in Borneo. *Journal of the Geological Society*, 155, 177-192.
- Moss, S.J., Chambers, J., Cloke, I., Satria, D., Ali, J.R., Baker, S., Milsom, J. and Carter, A., 1997. New observations on the sedimentary and tectonic evolution of the Tertiary Kutai Basin, East Kalimantan. In: Fraser, A.J., Matthews, S.J., Murphy, R.W. (eds.), *Petroleum Geology of Southeast Asia*. Geological Society of London Special Publication, 126, 395-416.
- Nugroho, B., Guritno, E., Mustapha, H., Darmawan, W., Subekti, A. and Davis, C., 2016. Post rift Oligocene marine source rock, a new petroleum system in Greater Bangkanai, Upper Kutai, Indonesia. *International Petroleum Technology Conference*, Thailand, 14-16 November.
- PERTAMINA, 1980. *Stratigrafi Tersier Cekungan Kutei - Kalimantan Timur*. Report Number IF 1387, unpublished report.
- Rotinsulu, L.F., Sardjono, S. and Heriyanto, N., 1993. The hydrocarbon generation and trapping mechanism within the northern part of Barito Basin, South Kalimantan. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association*, 22nd Annual Convention, 607-633.
- Sapiie, B., Rifiyanto, A. and Perdana, L.A., 2014. Cleats analysis and CBM potential of the Barito Basin, South Kalimantan, Indonesia. *AAPG International Conference & Exhibition*, Istanbul, Turkey, 14-17 September.
- Satyana, A.H. and Silitonga, P.D., 1994. Tectonic reversal in East Barito Basin, South Kalimantan: consideration of the types of inversion structures and petroleum significance. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association*, 23rd Annual Convention, 57-74.
- Satyana, A.H., 1994. The Northern Massifs of the Meratus

- Mountains, South Kalimantan: nature, evolution and tectonic implications to the Barito structures. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association, 23rd Annual Convention*, 457-470.
- Satyana, A.H., 1995. Paleogene unconformities in the Barito Basin, Southeast Kalimantan: A concept for the solution of the "Barito Dilemma" and a key to the search for Paleogene structures. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association, 24th Annual Convention*, 263-275.
- Satyana, A.H., 1996. Adang-Lupar Fault, Kalimantan: controversies and new observations on the trans-Kalimantan megashear. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association, 25th Annual Convention*, 124-143.
- Satyana, A.H., Nugroho, D. and Surantoko, I., 1999. Tectonic controls on the hydrocarbon habitats of the Barito, Kutei, and Tarakan Basins, Eastern Kalimantan, Indonesia: major dissimilarities in adjoining basins. *Journal of Asian Earth Science*, 17, 99-122.
- Schenk, C.J., Brownfield, M.E., Charpentier, R.R., Cook, T.A., Klett, T.R., Kirschbaum, M.A., Pitman, J.K., Pollastro, R.M. and Tennyson, M.E., 2010. Assessment of undiscovered oil and gas resources of southeast Asia, 2010. *U.S. Geological Survey Fact Sheet*, 2010-3015.
- Sikumbang, N., 1990. The geology of the Meratus Mountains South Kalimantan, Indonesia. *Geology Indonesia*, 13, 1-31.
- Siregar, M.S. and Sunaryo, R., 1980. Depositional environment and hydrocarbon prospects, Tanjung Formation, Barito Basin, Kalimantan. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association, 9th Annual Convention*, 379-400.
- Smyth, H.R., Hall, R. and Nichols, G.J., 2008. Cenozoic volcanic arc history of East Java, Indonesia: The stratigraphic record of eruptions on a continental margin. In: Draut, A.E., Clift, P.D., Scholl, D.W. (eds.), *Formation and Applications of the Sedimentary Record in Arc Collision Zones*. Geological Society of America Special Paper, 436, 199-222.
- Subekti, A., Mustapha, H., Guritno, E., Smart, J., Susilo, A., Nugroho, B., Darmawan, W. and Wilson, M., 2015. New insights into the Kerendan carbonate platform: an Oligocene reservoir from the Upper Kutai Basin, Kalimantan. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association, 39th Annual Convention*.
- Sumotarto, T.A., Haris, A., Riyanto, A. and Usman, A., 2016. Shale characterization on Barito field, Southeast Kalimantan for shale hydrocarbon exploration. *AIP Conference Proceedings*, 1862(1), p. 030195.
- van de Weerd, A.A. and Armin, R.A., 1992. Origin and evolution of the tertiary hydrocarbon-bearing basins in Kalimantan (Borneo), Indonesia. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 76, 1778-1803.
- van de Weerd, A.A., Armin, R.A., Mahadi, S. and Ware, P.L.B., 1987. Geologic setting of the Kerendan gas and condensate discovery, tertiary sedimentation and paleogeography of the northwestern part of the Kutei Basin, Kalimantan, Indonesia. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association, 16th Annual Convention*, 317-338.
- Wain, T. and Berod, B., 1989. The tectonic framework and paleogeographic evolution of the Upper Kutei Basin. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association, 18th Annual Convention*, 55-78.
- Wilson, M.E.J. and Moss, S.J., 1999. Cenozoic palaeogeographic evolution of Sulawesi and Borneo. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 145, 303-337.
- Witts, D., Davies, L. and Morley, R., 2014. Uplift of the Meratus Complex: sedimentology, biostratigraphy, provenance and structure. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association, 38th Annual Convention*, IPA14-G-052.
- Witts, D., Davies, L., Morley, R.J. and Anderson, L., 2015. Neogene Deformation of East Kalimantan: A regional perspective. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association, 39th Annual Convention*, FA96-1.0-027, 1-11.